

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Μελέτη της έναρξης και διάδοσης ρωγμής σε κόπωση χαλύβων
υψηλής αντοχής**

Του Διπλωματούχου Μηχανικού Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων Παν.
Αιγαίου, 2010

ΠΕΤΡΟΥ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης, Λέκτορας Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
2012

© 2012 Πέτρος Χριστοδούλου

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής
(Επιβλέπων)

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας , Λέκτορα κ. Αλέξη Κερμανίδη για την πολύτιμη βοήθειά του, που σε συνδυασμό με το άριστο κλίμα συνεργασίας, διευκόλυνε σημαντικά το έργο μου για την εκπόνηση της.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και τον Υποψήφιο Διδάκτωρ κ. Ανδρέα Τζαμτζή, για την πολύτιμη βοήθειά τους και τις υποδείξεις τους κατά την διάρκεια αυτής της εργασίας.

Επιθυμώ να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στην Κατερίνα Τσότσου, τον Λευτέρη Μπένο, τον Νικόλα Πολυχρονόπουλο και τον Δημήτρη Τσοκόλη για τις αξέχαστες στιγμές και την ηθική υποστήριξη που μου χάρισαν, καθ' όλο το διάστημα παραμονής μου στην όμορφη πόλη του Βόλου.

Θα ήμουν τουλάχιστον αγνώμων, αν δεν ευχαριστούσα τους γονείς μου, Ιωάννη και Παρασκευή, τον αδερφό και συνάδελφό μου Χρόνη, που στάθηκαν δίπλα μου όλα τα χρόνια των σπουδών μου, αλλά κυρίως που με δίδαξαν να έχω ήθος και αξιοπρέπεια και να προσπαθώ πάντοτε για το καλύτερο.

Πέτρος Χριστοδούλου

Περίληψη

Στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας σήμερα πραγματοποιείται εκτεταμένη έρευνα με σκοπό την εξέλιξη των χαλύβδινων τμημάτων που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να αποφευχθούν πρόωρες αστοχίες στις κατασκευές και να αυξηθεί έτσι η διάρκεια ζωής τους. Η τάση όμως για παραγωγή αυτοκινήτων φιλικών προς το περιβάλλον, καθιστά ως αρκετά σημαντική την παράμετρο του βάρους στις κατασκευές αυτές καθώς το αυξημένο βάρος συνδυάζεται με υψηλή κατανάλωση και εκπομπή ρύπων CO₂. Η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής σε αυξημένο ποσοστό στο πλαίσιο των αυτοκινήτων είναι μια υποσχόμενη λύση προς αυτή την κατεύθυνση. Συνεπώς, η μελέτη της συμπεριφοράς των χαλύβων υψηλής αντοχής, κατά την καταπόνηση με δυναμικές φορτίσεις και η διάρκεια ζωής αυτών, κρίζει ιδιαίτερης σημασίας για την αυτοκινητοβιομηχανία και την εξέλιξή της. Σημαντικό πρόβλημα σε τέτοιες κατασκευές, οι οποίες δέχονται δυναμικές καταπονήσεις είναι η επίδραση του φαινομένου της κόπωσης, κατά το οποίο με τον χρόνο λειτουργίας μειώνεται η ικανότητα του υλικού να φέρει με ασφάλεια τα φορτία που δέχεται. Η γνώση λοιπόν του μηχανισμού έναρξης και διάδοσης της ρωγμής στα υλικά κατά την κόπωση, μπορεί να οδηγήσει στον καλύτερο σχεδιασμό των κατασκευών της αυτοκινητοβιομηχανίας προς αποφυγή των αστοχιών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι να εξετάσει την συμπεριφορά έναρξης και διάδοσης της ρωγμής σε κόπωση σε δύο νέους χάλυβες υψηλής αντοχής που χρησιμοποιούνται στον κλάδο αυτό. Τον χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled και τον χάλυβα DualPhase 500 Cold Rolled Full Hard. Ακόμη, χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της διάρκειας ζωής σε κόπωση και του ρυθμού της διάδοσης της ρωγμής (νόμοι Basquin και Paris), επιχειρείται εκτίμηση της διάρκειας ζωής που απαιτείται για την έναρξη και την διάδοση της ρωγμής μέχρι την αστοχία. Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με και χωρίς εγκοπή από τους δύο χάλυβες και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κόπωσης όπου προσδιορίστηκαν πειραματικά οι φάσεις έναρξης ρωγμής κόπωσης και διάδοσης μέχρι τη θραύση.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι, ο χάλυβας DP 500 Cold Rolled Full Hard φαίνεται να υπερτερεί του χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled όσον αφορά στη συνολική διάρκεια ζωής κατά τις δυναμικές φορτίσεις, αλλά ο χάλυβας TRIP 700 φαίνεται να έχει μικρότερη ευαισθησία στις μεταβολές της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης κατά την κόπωση. Σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών με εγκοπή κατά την κόπωση, η παρουσία εγκοπής

υποβαθμίζει αισθητά τη διάρκεια ζωής και των δύο υλικών. Ο χάλυβας DP 500, δείχνει να παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή στην βλάβη από τον TRIP 700.

Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με την μεθοδολογία εκτίμησης της εκκίνησης και διάδοσης των ρωγμών που αναπτύσσεται με βάση τους νόμους Basquin και Paris.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ιστορική αναδρομή	2
1.3 Η έννοια της μικρής ρωγμής	8
2. Κόπωση	12
2.1 Γενικά	12
2.2 Μηχανική της θραύσης σε ρηγματωμένα στοιχεία	14
2.3 Πρόβλεψη της αστοχίας του υλικού και διάρκεια ζωής	16
2.4 Όρια της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας	18
2.5 Υπολογιστικά μοντέλα πρόβλεψης N_f , $N_{ΕΚΚ}$ και $N_{διαδ}$	19
3. Χάλυβες στην αυτοκινητοβιομηχανία	21
3.1 Γενικά	21
3.2 Χάλυβες DP (Dual Phase Steels)	22
3.2.1 Χαρακτηριστικά χαλύβων DP	22
3.2.2 Θερμική κατεργασία των χαλύβων DP	22
3.3 Χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity Steels)	22
3.3.1 Χαρακτηριστικά χαλύβων TRIP	23
3.3.2 Θερμική κατεργασία χαλύβων TRIP	24
3.3.3 Πλαστικότητα μετασχηματισμού	25
4. Πειραματική διαδικασία	27
4.1 Στόχοι	27
4.2 Πειραματική διάταξη	27
4.3 Υλικά δοκιμών	28
4.4 Προετοιμασία δοκιμών	29
4.5 Πειράματα εφελκυσμού	34
4.6 Πειράματα κόπωσης	35
5. Αποτελέσματα	37
5.1 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού	38
5.2 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης	39
5.2.1 Δοκίμια χωρίς εγκοπή	39
5.2.2 Δοκίμια με εγκοπή	41
5.3 Προσδιορισμός σταθερών Basquin	42
5.4 Μετρήσεις του μήκους ρωγμής	45
5.5 Προσδιορισμός σταθερών Paris	49
5.6 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής και κύκλων για την έναρξη ρωγμής μέσω αριθμητικής λύσης των νόμων Basquin και Paris	51

5.7 Μεθοδολογία εκτίμησης της διάρκειας ζωής για την εκκίνηση της ρωγμής	55
6. Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	57
6.1 Δοκιμή εφελκυσμού	57
6.2 Δοκιμές κόπωσης.....	57
6.2.1 Δοκίμια χωρίς εγκοπή	57
6.2.2 Δοκίμια με εγκοπή	58
6.3 Έναρξη και διάδοση ρωγμής	59
6.4 Εγκυρότητα πρόβλεψης νόμων Basquin και Paris	60
6.5 Πρόβλεψη έναρξης και διάδοσης ρωγμής	60
7. Συμπεράσματα	62
8. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	64
Βιβλιογραφία	65
Παράρτημα.....	67
A.1 Προσέγγιση πειραματικών σημείων για την εξαγωγή των σταθερών Basquin .	67
A.2 Προσέγγιση πειραματικών σημείων για την εξαγωγή των σταθερών Paris	69
A.3 Αλγόριθμος πρόβλεψης διάδοσης ρωγμής σύμφωνα με το νόμο Paris.....	70

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled(κατά βάρος %).....	28
Πίνακας 2. Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα DP 500 Cold Rolled Full Hard(κατά βάρος %)	29
Πίνακας 3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών με εγκοπή και υπολογισμός του ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t	34
Πίνακας 4. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των δύο υλικών.....	39
Πίνακας 5. Συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 χωρίς εγκοπή.....	39
Πίνακας 6. Συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή.....	41
Πίνακας 7. Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων κόπωσης για την εξαγωγή των σταθερών Basquin	43
Πίνακας 8. Υπολογισμός σταθερών Basquin	44
Πίνακας 9. Ποσοστά διάρκειας ζωής σε κόπωση των δοκιμών κατά την φάση έναρξης της ρωγμής	49
Πίνακας 10. Υπολογισμός σταθερών Paris	50
Πίνακας 11. Παραμετρική μελέτη πρόβλεψης της εκκίνησης ρωγμής.....	55
Πίνακας 12. Υπολογισμός συντελεστή ευαισθησίας εγκοπής.....	58

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Καμπύλη σ - ϵ χάλυβα TRIP 700	38
Διάγραμμα 2. Σύγκριση συμπεριφοράς σ - ϵ χαλύβων TRIP 700 και DP 500	38
Διάγραμμα 3. Καμπύλη κόπωσης (σ -N) χάλυβα TRIP 700 χωρίς εγκοπή	40
Διάγραμμα 4. Καμπύλη κόπωσης (σ -N) χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή	41
Διάγραμμα 5. Διάγραμμα κόπωσης (σ -N) με συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα υλικά TRIP 700 και DP 500	42
Διάγραμμα 6. Ισοδύναμο πλάτος τάσης συναρτήσει κύκλων σε λογαριθμικούς άξονες	44
Διάγραμμα 7. Μήκος ρωγμής συναρτήσει κύκλων χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή	48
Διάγραμμα 8. Μήκος ρωγμής συναρτήσει κύκλων για τους χάλυβες TRIP 700 και DP 500..	48
Διάγραμμα 9. «Εικονικός» ρυθμός διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔΚ για το εύρος 15-20 MPa \sqrt{m}	50
Διάγραμμα 10. Καμπύλες σ -N που προέκυψαν από την αριθμητική λύση του νόμου Basquin για την συνολική διάρκεια ζωής (N_f) του χάλυβα TRIP 700	51
Διάγραμμα 11. Καμπύλες σ -N που προέκυψαν από την αριθμητική λύση του νόμου Basquin για την συνολική διάρκεια ζωής (N_f) του χάλυβα DP 500	52
Διάγραμμα 12. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής για το Δοκίμιο 3 του χάλυβα TRIP 700	53
Διάγραμμα 13. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής για το Δοκίμιο 6 του χάλυβα TRIP 700	53
Διάγραμμα 14. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής για τον χάλυβα DP 500	54
Διάγραμμα 15. Πρόβλεψη «εικονικού» ρυθμού διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔΚ	54

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του ατυχήματος του αεροπλάνου τύπου Boeing 737 της Aloha Airlines	8
Εικόνα 2. Πραγματικές ακολουθίες φορτίων (ASTM),(α) Πτήση αεροσκάφους, (β) Κινούμενο όχημα	12
Εικόνα 3. Απαρχή (στάδιο I) και διάδοση ρήγματος στα υλικά (στάδιο II)	14
Εικόνα 4. Χαλύβδινα μέρη οχήματος	23
Εικόνα 5. Τυπική μικροδομή χάλυβα TRIP. Με λευκό χρώμα απεικονίζεται ο παραμένων ωστενίτης.....	25
Εικόνα 6. Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού Instron του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών	28
Εικόνα 7. Μικροδομή χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled (x1000) [25].....	28
Εικόνα 8. Μικροδομή χάλυβα DP 500 Cold Rolled Full Hard (x1000)	29
Εικόνα 9. Δοκίμια εφελκυσμού	30
Εικόνα 10. Δοκίμιο κόπωσης χωρίς εγκοπή.....	30
Εικόνα 11. Δοκίμιο κόπωσης με εγκοπή στην μηχανή εφελκυσμού	32
Εικόνα 12. Διάγραμμα K_I συναρτήσει του λόγου $2t/D$, για επίπεδα δοκίμια [24]	33
Εικόνα 13. Γεωμετρία εγκοπής Δοκιμίου3. (α) Όπως παραλήφθηκε από το μηχανουργείο, (β) μετά τις κατεργασίες λείανσης και καθαρισμού.....	34
Εικόνα 14. Επιφάνεια θραύσης από κόπωση Δοκιμίου 14 του χάλυβα TRIP 700. Παρατηρείται ξεκάθαρα η περιοχή έναρξης και διάδοσης της ρωγμής στο υλικό	40
Εικόνα 15. Χαρακτηριστικά αποτυπώματα ρέπλικας για το δοκίμιο 3 του χάλυβα TRIP 70045	
Εικόνα 16. Εξέλιξη ρήγματος σε χάλυβα TRIP 700 υπό κόπωση με μέγιστη τάση 200MPa (Δοκίμιο 3).....	46
Εικόνα 17. Εξέλιξη ρήγματος σε χάλυβα TRIP 700 υπό κόπωση με μέγιστη τάση 200MPa (Δοκίμιο 6).....	47
Εικόνα 18. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 6 χάλυβα TRIP 700(x16). Παρατηρείται η περιοχή έναρξης και διάδοσης της ρωγμής και υπολογίζονται τα μήκη a και b	56

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Καμπύλη σ-N	3
Σχήμα 2. Σταθερές Basquin	4
Σχήμα 3. Ρυθμός διάδοσης της ρωγμής σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων.....	6
Σχήμα 4. Σχηματική παρουσίαση της εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση από εγκοπή [17]	10
Σχήμα 5. Ονοματολογία περιοδικών φορτίων κόπωσης.....	13
Σχήμα 6. (α) Αύξηση του μήκους ρωγμής με τη πάροδο των κύκλων φόρτισης. (β) Υπολειπόμενος χρόνος ζωής μέχρι το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ρωγμής	15
Σχήμα 7. Ελάττωση της αντοχής του υλικού λόγω αύξησης του μήκους ρωγμής.....	15
Σχήμα 8. Προσέγγιση του συντελεστή F για δοκίμιο με πλευρική ρωγμή [18]	18
Σχήμα 9. Πλαστική ζώνη ρωγμής και μέγεθος πεδίου K ώστε να ισχύει η Γραμμική Ελαστική Θεωρία	18
Σχήμα 10. Χαρακτηριστικά χαλύβων υψηλής αντοχής	21
Σχήμα 11. Στάδια θερμικής κατεργασίας χαλύβων TRIP.....	25
Σχήμα 12. Σχηματική παράσταση μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υποβοηθούμενου από την τάση α και προκαλούμενου από την παραμόρφωση β.....	26
Σχήμα 13. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου εφελκυσμού (ASTM E 8 M).....	31
Σχήμα 14. (α)Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων κόπωσης χωρίς εγκοπή και (β) με εγκοπή (ASTM E 466)	31
Σχήμα 15. Διάγραμμα ροής εργασιών της παρούσας μελέτης.....	37

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας του στη γη, ο άνθρωπος χρειάστηκε να δημιουργήσει διάφορες κατασκευές, προκειμένου να καλύψει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του. Ως “κατασκευή”, από τη σκοπιά της μηχανικής, ορίζεται εκείνη η διευθέτηση των υλικών που εξυπηρετεί στην βέλτιστη και ασφαλή παραλαβή των επιβαλλόμενων μηχανικών φορτίων. Οι βασικές απαιτήσεις που τίθενται γενικά για μία κατασκευή, είναι λοιπόν αυτές της αντοχής και της λειτουργικότητας. Σκοπός του μηχανικού ήταν ανέκαθεν η αυστηρή τήρηση των δύο παραπάνω απαιτήσεων, σε συνδυασμό όμως με την ικανοποίηση – κατά το δυνατό – και άλλων, κυρίως οικονομικής φύσεως απαιτήσεων, με στόχο τη βέλτιστη απόδοση της κατασκευής.

Συνεπώς, ο βέλτιστος σχεδιασμός, είναι το αντικείμενο έρευνας κάθε μηχανικού, ο οποίος στοχεύει στη σχεδίαση ενός μηχανήματος, ενός εξαρτήματος ή ενός κτιρίου, το οποίο καλείται να εξυπηρετήσει λειτουργικές ανάγκες. Ο σχεδιασμός οφείλει να ικανοποιεί τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τις λειτουργικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα να ελαχιστοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, όπως είναι το κόστος της κατασκευής.

Η επιλογή των υλικών όμως που θα χρησιμοποιηθούν, είναι ίσως το κρισιμότερο βήμα που πρέπει να κάνει ο μηχανικός προτού προχωρήσει στην υλοποίηση της κατασκευής, η οποία θα πρέπει να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, με ένα συγκεκριμένο τρόπο και να επιδεικνύει την κατάλληλη αντοχή. Μια λανθασμένη επιλογή υλικού ή ειδικότερα, μια υπερεκτίμηση της αντοχής ενός τμήματος της κατασκευής μπορεί να αποβεί καταστροφική για την ίδια ή και ακόμη χειρότερα, να οδηγήσει στην απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας σήμερα πραγματοποιείται εκτεταμένη έρευνα με σκοπό την εξέλιξη των χαλύβδινων τμημάτων που χρησιμοποιούνται, με γνώμονα την ασφάλεια στις κατασκευές και την παραγωγή κατασκευών φιλικών προς το περιβάλλον. Σε αυτή την κατεύθυνση, η ελαχιστοποίηση του βάρους στις κατασκευές είναι σημαντική. Παράλληλα, τα οχήματα καταπονούνται με δυναμικές φορτίσεις, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή των στοιχείων που τις αποτελούν. Λόγω της πολυπλοκότητας τους, τα δομικά μέρη απαιτείται να έχουν συγκεκριμένες διαμορφώσεις,

οπές ή ακόμη και εγκοπές, έτσι ώστε να εξυπηρετούν κατάλληλα τον σκοπό τους. Οι εγκοπές και οι γεωμετρικές διαμορφώσεις, ως σημεία τοπικής ασυνέχειας των υλικών, εισάγουν πεδία συγκέντρωσης τάσεων στα στοιχεία, κάτι το οποίο μειώνει δραστικά την αντοχή τους σε κόπωση. Το αποτέλεσμα των επαναλαμβανόμενων αυτών δυναμικών φορτίσεων σε στοιχεία με γεωμετρικές ασυνέχειες, προκαλεί συσσώρευση βλάβης, η οποία εμφανίζεται με τη μορφή ρωγμής ή ρωγμών και έτσι από τη δεκαετία του 1980 και έπειτα, η φιλοσοφία του σχεδιασμού, έχει εισάγει την έννοια 'ανοχή στην βλάβη'. Στόχος είναι λοιπόν, δεδομένης της ύπαρξης της βλάβης, να εξασφαλιστεί ότι η εξέλιξή της μπορεί να ελεγχθεί. Βέβαια γίνεται αντιληπτό, πως η εξέλιξη της βλάβης σχετίζεται με αρκετούς παράγοντες όπως είναι η μικροδομή των υλικών, οι μηχανικές ιδιότητές των, καθώς επίσης με τα εφαρμοζόμενα φορτία και τη γεωμετρία των ίδιων των στοιχείων.

Συνεπώς, η μελέτη της συμπεριφοράς των χαλύβων υψηλής αντοχής σε κόπωση και ανοχή στην βλάβη, κατά την καταπόνηση με δυναμικές φορτίσεις, χρίζει ιδιαίτερης σημασίας στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Ο όρος κόπωση άρχισε να εμφανίζεται μετά το **1840** για να περιγράψει τις αστοχίες εκείνες που οφείλονταν σε διαρκή καταπόνηση από επαναλαμβανόμενες τάσεις. Παρόλο που οι τιμές των μέγιστων τάσεων δεν ξεπερνούσαν τα όρια ασφαλείας, η συστηματική ή περιοδική επανάληψή τους οδηγούσε τα υλικά και τις κατασκευές σε αστοχία.

Στις επόμενες δεκαετίες, ο *Wöhler* πραγματοποίησε τα πρώτα συστηματικά πειράματα κόπωσης, ενώ ήταν ο πρώτος που εισήγαγε το διάγραμμα Τάσης-Κύκλων, με την εμφάνιση της έννοιας «Όριο Κόπωσης» του υλικού, και διατύπωσε τη σχέση:

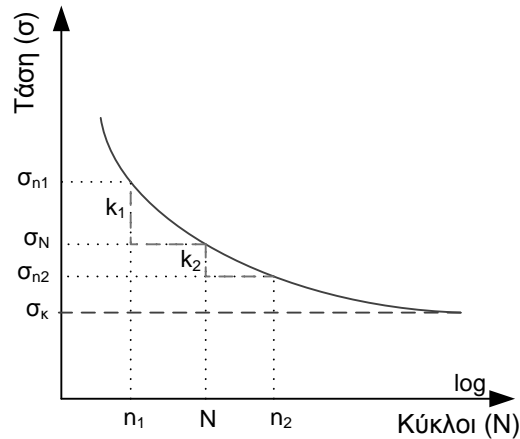
$$\sigma_n = \sigma_N \left(\frac{N}{n} \right)^k \quad (1.1)$$

όπου,

σ_n , η αντοχή σε κόπωση για αστοχία στους n κύκλους,
 σ_N , η τάση που προκαλεί αστοχία στους N κύκλους, και,

k , η κλίση της ευθείας στο διάγραμμα σ - N ,

και σ_k η τιμή της τάσης για την οποία προκύπτει άπειρη διάρκεια ζωής (ή όριο κόπωσης).



Σχήμα 1. Καμπύλη σ - N

Πιο συγκεκριμένα, αν είναι γνωστή η τιμή εκείνη της τάσης (έστω σ_N) για την οποία προήλθε αστοχία σε N κύκλους, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της τάσης για αστοχία (έστω σ_{n1}) σε κάποιους κύκλους n , από την εμπειρική σχέση $\sigma_{n1} = \sigma_N \left(\frac{N}{n} \right)^{k_1}$ στο **Σχήμα 1**.

Παράλληλα, το **1843** ο πολιτικός μηχανικός *W. Rankine* δημοσίευσε τις διαπιστώσεις του σχετικά με τη βαθμιαία φθορά και γήρανση του υλικού, τη συσσώρευση τάσεων και την εμφάνιση ρωγμών στις αιχμηρές γωνίες και πρότεινε μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας στα σημεία αυτά με σκοπό την εξομάλυνση των τασικών πεδίων [1].

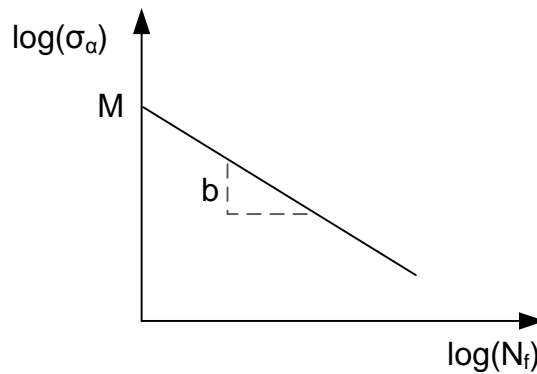
Σαν πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των αστοχιών, βελτιώθηκαν οι μέθοδοι παραγωγής και, κατά συνέπεια, η ποιότητα των υλικών. Έτσι μειώθηκε η συχνότητα των βλαβών καθώς καθυστέρουσε περισσότερο η εμφάνισή τους και βελτιώθηκε έτσι εν μέρει η αξιοπιστία των κατασκευών.

Το **1900** άρχισε να χρησιμοποιείται για πρώτη φορά το μικροσκόπιο, για τη μελέτη των μικρορωγμών που εμφανίζονταν και του μηχανισμού των θραύσεων, δίνοντας έτσι μια νέα ώθηση στην μελέτη του φαινομένου.

Το **1910** ο *Basquin* χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα του *Wöhler* από καμπύλες σ - N , πρότεινε μια γραμμική σχέση μεταξύ των εφαρμοζόμενων τάσεων και των κύκλων φόρτισης [2]. Έδειξε ότι κατά την κυκλική καταπόνηση στην πολυκυκλική περιοχή (10^4 - 10^7 κύκλους), η διάρκεια ζωής (N_f) παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά σε συνάρτηση με πλάτος της εφαρμοζόμενης τάσης (σ_a) δεδομένων δυο σταθερών για κάθε υλικό και $\sigma_m=0$, διατυπώνοντας την σχέση:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2} = M(2N_f)^b \quad (1.2)$$

όπου,
 M , ο συντελεστής αντοχής σε κόπωση και
 b , η κλίση της ευθείας στο διάγραμμα $\log(\sigma_a) - \log(N_f)$.



Σχήμα 2. Σταθερές Basquin

Για ένα δεδομένο πλάτος τάσης σ_a όμως με $\sigma_m \neq 0$, ο *Goodman* τροποποίησε τον νόμο του Basquin, εισάγοντας τον όρο «ισοδύναμο πλάτος τάσης σ_f' », όπου αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο πλάτος τάσης σ_a που υπολογίζει το ίδιο N_f αλλά για $\sigma_m \neq 0$. Ο νόμος του *Goodman* για την πολυκυκλική κόπωση, διατυπώνεται ως εξής:

$$\sigma_f' = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}}} \quad (1.3)$$

Το 1920, ο *Griffith* δημοσίευσε τα θεωρητικά και πειραματικά του αποτελέσματα σε ψαθυρά υλικά και η θεωρία του συνδέει την τάση θραύσης με το μέγεθος της ρωγμής. Ο *Griffith* θεώρησε ότι οι μικρορωγμές και οι ατέλειες που υπάρχουν στο υλικό αυξάνουν σε διαστάσεις, ενώνονται και διαδίδονται, όταν επιβληθεί στο υλικό μια εξωτερική φόρτιση. Επιπλέον, θεώρησε ότι υπάρχει ένα ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ δυναμικής ενέργειας από τη φόρτιση και επιφανειακής ενέργειας από τη ρωγμή [3].

Διατύπωσε λοιπόν, τη κλασική σήμερα θεώρηση, ότι μια προϋπάρχουσα ατέλεια τείνει να διαδοθεί αν πρόκειται έτσι αν μειωθεί η συνολική ενέργεια του συστήματος. Θεωρώντας ότι υπάρχει ένα ισοζύγιο ενεργειών μεταξύ, α) της μείωσης της ελαστικής παραμορφωτικής ενέργειας εντός ενός φορτισμένου σώματος, καθώς διαδίδεται η ρωγμή και β) της ενέργειας που απαιτείται για τη καταπολέμηση των δυνάμεων συνοχής και τη

δημιουργία των νέων επιφανειών της ρωγμής, διαπίστωσε ότι η κρίσιμη τάση σ_{cr} και το κρίσιμο μήκος ρωγμής a_{cr} συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma_{cr} \sqrt{\pi a_{cr}} = (2E\gamma_s)^{1/2} = \sigma \alpha \theta. \quad (1.4)$$

Η εργασία του *Griffith* αγνοήθηκε για πάνω από 20 χρόνια μέχρι και τον Β' Π.Π., όποτε και η ομάδα εργασίας του *G.R. Irwin* την χρησιμοποίησε και την επέκτεινε.

Η ενεργειακή προσέγγιση του *Griffith* ήταν η βάση για την ανάπτυξη της Γραμμικής Ελαστικής Θραυστομηχανικής (LEFM- Linear Elastic Fracture Mechanics). Η θεώρηση αυτή είναι ακριβής μόνο όταν άλλα φαινόμενα όπως η πλαστική παραμόρφωση, απουσιάζουν και έτσι σήμερα ο κλάδος της Θραυστομηχανικής αναπτύσσεται προς μια πιο ρεαλιστική θεώρηση που περιλαμβάνει τη πλαστική παραμόρφωση και ονομάζεται Πλαστική Ελαστική Θραυστομηχανική (PEFM). Πιο συγκεκριμένα, αν το μέγεθος της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται κατά την διάδοση του ρήγματος είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με το μήκος της ρωγμής, τότε ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιείται η πλαστική ανάλυση με ταυτόχρονο προσδιορισμό του φορτίου κατάρρευσης υπό πλαστικές παραμορφώσεις [4-6].

Μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα εμφανίστηκαν πολλά νέα υλικά και τεχνικές κατασκευής. Την ίδια εποχή όμως δημιουργήθηκε και το πιο σκληρό πεδίο δοκιμών κάθε ανθρώπινης κατασκευής, ο 2^{ος} Παγκόσμιος πόλεμος. Κατά τη διάρκειά του διαπιστώθηκε, ο ρόλος της κόπωσης και των ρωγμών στις καταστροφές των κατασκευών. Τα παραπάνω οδήγησαν στην αναζήτηση και μελέτη των προϋπαρχόντων ατελειών μέσα στο υλικό με τη μορφή μικρορωγμών και της επίδρασης που έχει επάνω τους η συγκέντρωση των τάσεων σε οπές, εγκοπές ή συγκολλήσεις. Από την περίοδο αυτή θα αρχίσει και η ταχύτερη ανάπτυξη της Μηχανικής των θραύσεων.

Το **1945** ο *Miner* διατύπωσε κατάλληλα ένα κριτήριο για τη γραμμική συσσώρευση βλαβών λόγω κόπωσης, ότι δηλαδή, η συνθήκη για αστοχία υπό κόπωση είναι:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = C \quad (1.5)$$

όπου, n_i ο αριθμός κύκλων φόρτισης με τάση σ_i που έχει υποστεί μια κατασκευή και N_i ο αριθμός κύκλων φόρτισης με την ίδια τάση σ_i που προκαλεί την αστοχία. Το κριτήριο αυτό συχνά καλείται και νόμος του *Miner*, ενώ αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα σημαντικό εργαλείο για τη πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των κατασκευών.

Το **1950**, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο άνοιξε νέους ορίζοντες για τη κατανόηση των μηχανισμών κόπωσης. Την ίδια εποχή, ο *Irwin* εισήγαγε σαν έννοια, τον συντελεστή έντασης τάσεων K [17], ο οποίος αποτέλεσε τη βάση της Γραμμικής Ελαστικής Θραυστομηχανικής και των μεθόδων πρόβλεψης της διάδοσης των ρωγμών υπό κόπωση (FCG – Fatigue Crack Growth), περιγράφοντάς τον ως:

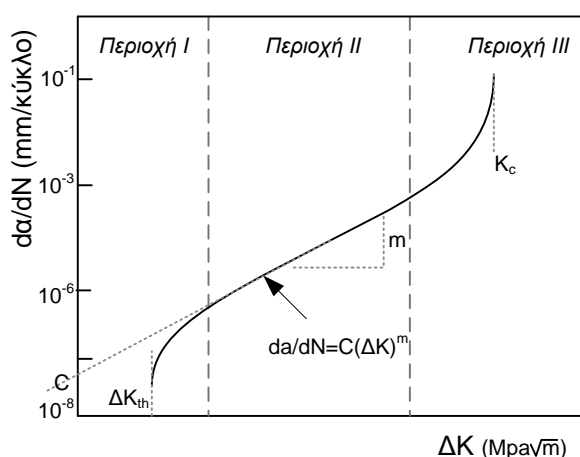
$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1.6)$$

όπου η συνάρτηση F είναι μια αδιάστατη ποσότητα που εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του δοκιμίου, w το πλάτος του και a το μήκος της ρωγμής.

Το **1963**, ο *Paris* έδειξε ότι ο ρυθμός αύξησης των ρωγμών υπό κόπωση (da/dN), μπορεί να περιγραφεί εμπειρικά με την μεταβολή του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK , αναπαριστώντας τα σημεία σε διπλή λογαριθμική κλίμακα [7].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.7)$$

Η εξίσωση που πρότεινε ο *Paris* είναι ίσως ο πιο γνωστός σήμερα εμπειρικός νόμος που περιγράφει ικανοποιητικά τον ρυθμό διάδοσης του ρήγματος σε συνάρτηση με τον συντελεστή έντασης τάσεων και ταιριάζει σε ένα μεγάλο αριθμό περιπτώσεων και δεδομένων. Η γραμμική συμπεριφορά που περιγράφει η Εξ. 1.7 αντιστοιχεί στην **περιοχή II** όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**.



Σχήμα 3. Ρυθμός διάδοσης της ρωγμής σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων

Πιο αναλυτικά:

Η **περιοχή I** αντιπροσωπεύει τα πρώτα στάδια ανάπτυξης της ρωγμής και της διάδοσης της μικρορωγμής. Ο ρυθμός διάδοσης τυπικά είναι της τάξεως των 10^{-6} mm/κύκλο ή ακόμη και μικρότερος. Η συγκεκριμένη περιοχή θεωρείται αρκετά ευαίσθητη και επηρεάζεται κυρίως από τα στοιχεία της μικροδομής του υλικού όπως το μέγεθος των κόκκων, τη μέση τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης καθώς επίσης και από τη θερμοκρασία. Ενδεχομένως, το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης περιοχής, είναι η τιμή εκείνη του συντελεστή έντασης τάσεων κάτω από την οποία δεν υπάρχει διάδοση του ρήγματος. Η τιμή αυτή περιγράφεται ως «κατώφλι» της διάδοσης της ρωγμής σε κόπωση και παρουσιάζεται ως ΔK_{th} . Το ΔK_{th} είναι μια τιμή που προσδιορίζεται πειραματικά, μειώνοντας σταδιακά την τιμή του K όπως περιγράφεται και από το έγγραφο των προδιαγραφών ASTM E467 (2000).

Η **περιοχή II** (περιοχή Paris) αντιπροσωπεύει ένα ενδιάμεσο στάδιο της διάδοσης της ρωγμής, όπου το μέγεθος της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται είναι πλέον συγκρίσιμο με το μέσο μέγεθος των κόκκων του υλικού. Στο σημείο αυτό, η ρωγμή ξεπερνά σε μήκος την τιμή τριών διαμέτρων κόκκου και πλέον δύναται να θεωρείται μακρορωγμή. Η χρήση των βασικών αρχών της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας της μηχανικής των θραύσεων σε αυτό το σημείο είναι αποδεκτή και τα σημεία μεταξύ των da/dN και ΔK παρουσιάζουν γραμμικότητα. Ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής είναι πλέον της τάξεως των 10^{-6} - 10^{-3} mm/κύκλο. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει μια σταθερή πλέον ανάπτυξη του ρήγματος ενώ η επιρροή της μικροδομής, της μέσης τάσης, της ολκιμότητας, του περιβάλλοντος ακόμη και του πάχους θεωρείται αρκετά μικρή.

Η **περιοχή III** αντιπροσωπεύει την ταχύτατη ανάπτυξη του μήκους ρωγμής, με υψηλούς ρυθμούς ($>10^{-3}$ mm/κύκλο) εξαιτίας της γρήγορης και ασταθούς διάδοσης της ρωγμής πριν την τελική αστοχία. Η σχέση των da/dN και ΔK είναι σχεδόν εκθετική και η τιμή του K προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή αντοχής σε θραύση K_c του υλικού. Μπροστά από το ρήγμα, οι τιμές της τάσης είναι αρκετά υψηλές ευνοώντας τη δημιουργία μεγάλου μεγέθους πλαστικής ζώνης. Σε αυτό το σημείο και εξαιτίας της ταχύτατης διαρροής στο υλικό, η θεωρία της Γραμμικής Ελαστικής Θραυστομηχανικής οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις και το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί μόνο μέσω της Πλαστικής Ελαστικής Θεωρίας. Η τιμή της μέσης τάσης, η μικροδομή του υλικού και το πάχος επηρεάζουν άμεσα αυτή την περιοχή, σε αντίθεση με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Παράλληλα, η ανάλυση για τη διάδοση της ρωγμής σε αυτή την περιοχή ανάγεται σε ένα πολυσύνθετο πρόβλημα,

αλλά συνήθως αγνοείται, καθώς πλέον έχει αρκετά μικρή σημασία για την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του υλικού υπό συνθήκες κόπωσης.

Γεγονός το οποίο ουσιαστικά συντέλεσε στην εκτεταμένη ανάλυση του μηχανισμού κόπωσης στα υλικά και καθιέρωσε τον όρο «ανοχή στην βλάβη» στον σχεδιασμό των σύγχρονων κατασκευών, θεωρείται το τραγικό δυστύχημα που συνέβη στο αεροσκάφος τύπου Boeing 737 της πτήσης 243 της εταιρείας Aloha Airlines στις 28 Απριλίου του **1988**. Η αστοχία μέρους της ατράκτου ξεκίνησε από περιοχή υψηλής καταπόνησης σε κόπωση ανάμεσα σε οπές συνδέσεως, όπου με τη συνέργια της διάβρωσης πραγματοποιήθηκε ταχύτατη θραύση (**Εικόνα 1**). Η ταχύτατη αυτή θραύση πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια πτήσης του αεροσκάφους και σε ύψος 24.000 ποδών. Το συγκεκριμένο ατύχημα αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης του φαινομένου της κόπωσης στην υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών, η οποία είναι προφανώς, πρωτεύουσας σημασίας.



Εικόνα 1. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του ατυχήματος του αεροπλάνου τύπου Boeing 737 της Aloha Airlines

1.3 Η έννοια της μικρής ρωγμής

Η συνολική διάρκεια ζωής ενός στοιχείου που καταπονείται σε κόπωση, συχνά θεωρείται ως το άθροισμα της διάρκειας ζωής μέχρι την εμφάνιση της ρωγμής και της διάρκειας ζωής κατά την διάδοση της ($N_f = N_{εκκ} + N_{διαδ}$). Αν και τα δύο στάδια εμφανέστατα διαφέρουν ποσοτικά, η ακριβής διάκρισή τους παραμένει ασαφής [8]. Οι υπολογισμοί για τη συνολική διάρκεια ζωής των στοιχείων πραγματοποιούνται με την αποτίμηση καμπυλών $\sigma-N$ από πειράματα κόπωσης, ενώ για την απομένουσα διάρκεια ζωής πραγματοποιούνται υπολογισμοί με την βοήθεια των διαγραμμάτων $da/dN = \Delta K$, όπως προκύπτουν από πειράματα κόπωσης σε συμβατικά δοκίμια με εγκοπή βάση προδιαγραφών, για τα οποία

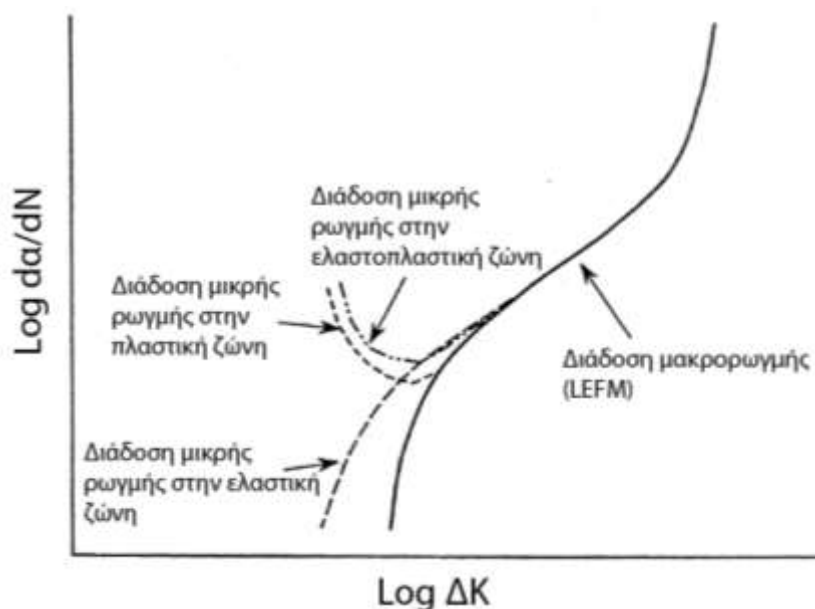
συχνά θεωρείται ότι ο ρυθμός διάδοσης του ρήγματος είναι ανεξάρτητος του σχήματος της εγκοπής.

Στην πραγματικότητα όμως, η γεωμετρία της εγκοπής δεν είναι ανεξάρτητη από τη διάδοση του ρήγματος. Η γεωμετρία αυτή καθορίζει τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t και συνεπώς για διάφορες τιμές αυτού η διάδοση του ρήγματος ακολουθεί διαφορετικούς ρυθμούς [9]. Παράλληλα, η γεωμετρία και η θέση της εγκοπής μπορεί να καθορίσει το όριο κόπωσης του στοιχείου. Πρόσφατα, προβλέφθηκε το όριο κόπωσης δοκιμίων με εγκοπή βασιζόμενο είτε στον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t , είτε στον συντελεστή έντασης τάσεων K_{th} καθώς η εγκοπή λήφθηκε σαν ρωγμή ισοδύναμου μήκους [10]. Όταν ένα στοιχείο υποβάλλεται σε συνθήκες κόπωσης, τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων και οι εγκοπές, ανεξαρτήτως μικροσκοπικής ή μακροσκοπικής κλίμακας, θεωρούνται ως προτιμώμενες θέσεις για την έναρξη της ρωγμής. Η θραύση όμως ενός στοιχείου εξαιτίας μιας εσωτερικής ατέλειας θεωρείται ότι θα συμβεί σε μεγαλύτερο χρόνο σε αντίθεση με μία ατέλεια, η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια του στοιχείου καθώς η αντίσταση στην ολίσθηση των κρυσταλλογραφικών επιπέδων στην επιφάνεια είναι ιδιαίτερα χαμηλή [11-12]. Συνεπώς, η θέση της ατέλειας, όποια στιγμή και αν εμφανιστεί, μπορεί να καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την απομένουσα διάρκεια ζωής του στοιχείου ή γενικά της κατασκευής.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, λόγω της συγκέντρωσης τάσεων εξαιτίας της γεωμετρικής ασυνέχειας, ευνοείται η εμφάνιση της ρηγματώσης στην αιχμή της εγκοπής. Όταν η διάδοση του ρήγματος εκκινήσει από την εγκοπή, ο ρυθμός διάδοσής του είναι γενικότερα μεγαλύτερος απ' ό,τι θα αναμενόταν χρησιμοποιώντας τον συντελεστή έντασης τάσεων, κυρίως διότι υπάρχει προγενέστερη συσσώρευση της βλάβης κατά την εκκίνηση του ρήγματος μπροστά από την εγκοπή [8]. Η σχέση μεταξύ του ρυθμού διάδοσης, da/dN και του εύρους του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK , για τις μικρές ρωγμές, σε αντίστοιχο διάγραμμα, δύναται να εμφανιστεί ως σχήμα τύπου "V" (**Σχήμα 4**).

Χρησιμοποιώντας δοκίμια μαλακού χάλυβα με κεντρικές οπές οι *Tanaka* και *Nakai* [13] διαπίστωσαν ότι κατά την απαρχή της μικρής ρωγμής, ο ρυθμός διάδοσής της αρχικά ήταν επιβραδυνόμενος με την αύξηση του μήκους του ρήγματος ενώ στη συνέχεια παρατηρήθηκε επιτάχυνση της διάδοσης ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο. Παράλληλα, οι *Pirpan* και *Stüewe* ανέφεραν ότι ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής κοντά σε μια εγκοπή συνήθως μειώνεται κατά την αύξηση του μήκους της, ενώ μόλις η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, ο ρυθμός αυτός σταθεροποιείται [14-15]. Από την στιγμή

όμως που σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις μπορούν να συμβούν στο άκρο της εγκοπής, ο *Miller* [16] πρότεινε ότι η Γραμμική Ελαστική θεωρία πρέπει να χρησιμοποιείται για την ανάλυση των μακρορωγμών, ενώ η Πλαστική Ελαστική θεωρία είναι απαραίτητη για την ανάλυση της διάδοσης των μικρορωγμών που αναπτύσσονται μέσα στις πλαστικές ζώνες της εγκοπής.



Σχήμα 4. Σχηματική παρουσίαση της εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση από εγκοπή [17]

Ταξινομώντας τις μικρορωγμές σύμφωνα με τους παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την απόκλιση της συμπεριφοράς τους από τις μακρορωγμές, έχει προταθεί η ακόλουθη κατηγοριοποίηση:

- 1) Οι *μηχανικά* μικρές ρωγμές έχουν μήκος που μπορεί να συγκριθεί με το μέγεθος της τοπικής πλαστικής παραμόρφωσης. Όπως λόγου χάρη, η ρωγμή που διαδίδεται μέσα σε μια πλαστική ζώνη. Ο ορισμός αυτός συνεπάγεται τους περιορισμούς που υποτάσσει η Γραμμική Ελαστική θεωρία.
- 2) Οι *μικροδομικά* μικρές ρωγμές έχουν μήκος που μπορεί να συγκριθεί με το μέγεθος το κόκκων του υλικού. Συνήθως, μια ρωγμή με μήκος μικρότερο από 3 φορές τη μέση διάμετρο κόκκου θεωρείται μικρορωγμή.
- 3) Οι *φυσικά* μικρές ρωγμές είναι ουσιαστικά ρωγμές με μήκος μικρότερο του 1 mm.

Συνεπώς, το πρόβλημα μελέτης της διάδοσης των μικρορωγμών, σε γενικές γραμμές μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερις συνιστώσες:

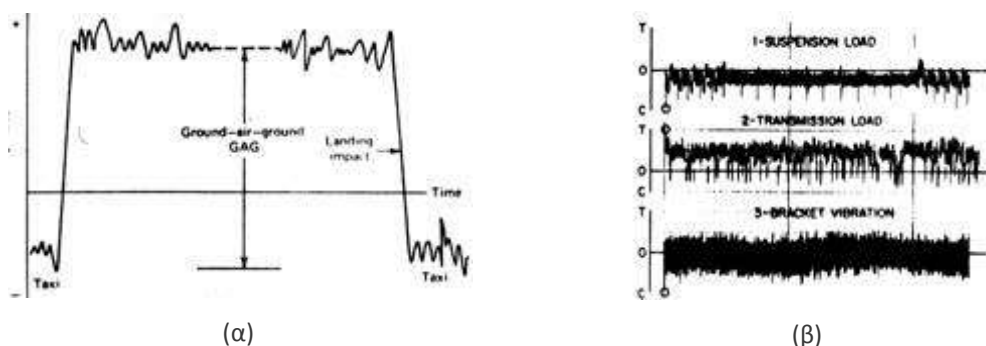
- Στην αδυναμία της Γραμμικής Ελαστικής θεωρίας της Θραυστομηχανικής να ποσοτικοποιήσει την συμπεριφορά αυτών των ρωγμών σε σύγκριση με τις ρωγμές που είναι λίγο μεγαλύτερες από κάποια χιλιοστά.
- Στον ουσιαστικά τριαξονικό χαρακτήρα των μικρών ρωγμών και παράλληλα στην επίδραση του σχήματος της εγκοπής κατά την διάδοσή τους, όπου η εντατική κατάσταση είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας.
- Στα διάφορα μεταλλογραφικά χαρακτηριστικά των υλικών, τα οποία επηρεάζουν την ανάπτυξη των μικρών ρωγμών, όπως οι διαφορές στις κινήσεις των γραμμοαταξιών και των μπάντων ολίσθησης των κρυσταλλογραφικών επιπέδων στα υλικά, το μέγεθος των κόκκων, το μέγεθος των στοιχείων καθώς και το σχήμα.
- Στην αδυναμία να εντοπιστεί ακόμη και με αναλυτικό μέσο ο ακριβής χρόνος σε κύκλους για την απαρχή του σχηματισμού της μικρής ρωγμής καθώς και η θέση της.

2. Κόπωση

2.1 Γενικά

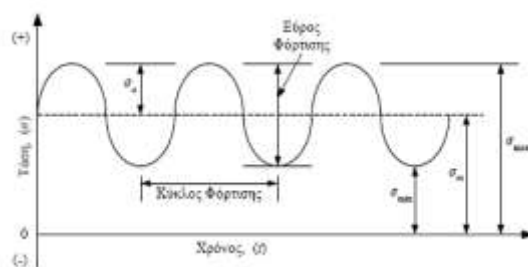
Αν βασιστεί κανείς στα αποτελέσματα στατικών πειραμάτων και θεωρήσει ότι μία φόρτιση που δεν ξεπέρνα το όριο ελαστικότητας του υλικού, μπορεί να επαναληφθεί άπειρες φορές, τότε σίγουρα θα λάβει μια εσφαλμένη εκτίμηση για την διάρκεια ζωής του. Όταν η φόρτιση επαναλαμβάνεται για χιλιάδες ή εκατομμύρια κύκλους, λόγω του μηχανισμού της κόπωσης, η θραύση ενός υλικού επέρχεται για τάσεις πολύ μικρότερες του στατικού ορίου αντοχής.

Στη πράξη όλες οι κατασκευές και τα εξαρτήματα αυτών, υφίστανται μια ποικιλία διαδοχικών φορτίσεων. Άλλα από αυτά είναι απλά και επαναλαμβανόμενα και άλλα είναι πολύπλοκα ή ακόμη και εντελώς τυχαία. Στην **Εικόνα 2** που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα ιστορικά φόρτισης δύο πολύπλοκων μηχανολογικών κατασκευών και η χρήσιμη πληροφορία που εξάγεται είναι η διαδοχική ακολουθία των φορτίσεων σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 2. Πραγματικές ακολουθίες φορτίων (ASTM), (α) Πτήση αεροσκάφους, (β) Κινούμενο όχημα

Μια απλή μορφή περιοδικής συνάρτησης φορτίου- χρόνου που χρησιμοποιείται στην εξέταση των φαινομένων κόπωσης των υλικών φαίνεται στο **Σχήμα 5**, όπου και σημειώνονται κάποια από τα κρίσιμα μεγέθη όπως είναι η μέγιστη τάση (σ_{max}), η ελάχιστη (σ_{min}), η μέση τάση (σ_m) και το πλάτος τάσης (σ_a).



Σχήμα 5. Ονοματολογία περιοδικών φορτίων κόπωσης

Οι αλγεβρικές σχέσεις που συνδέουν τις παραπάνω ποσότητες είναι:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \sigma_{\min} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$

Αρκετά συχνά χρησιμοποιείται και ο λόγος τάσεων R , ο οποίος ορίζεται ως:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Η θραύση ενός στοιχείου ή μιας κατασκευής κατά την κυκλική καταπόνηση επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και οι κυριότεροι εξ' αυτών είναι:

- Το επίπεδο της εφαρμοζόμενης τάσης.
- Την παρουσία ατελειών ή επιφανειακών ελαττωμάτων.
- Τις ιδιότητες του υλικού.
- Τον μηχανισμό με τον οποίο δημιουργείται η ρωγμή και ολοκληρώνεται η θραύση.

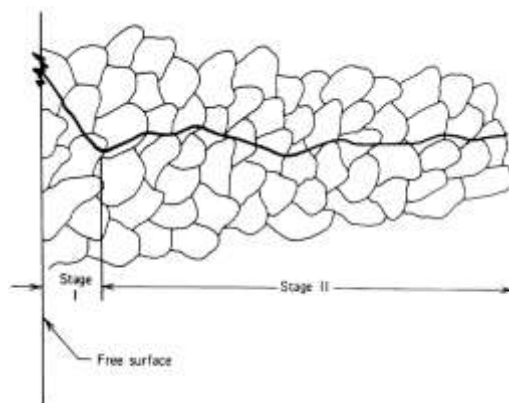
Είναι απαραίτητο λοιπόν να υπάρχουν μεθοδολογίες εκτίμησης της υπάρχουσας βλάβης και εξέλιξή της, έτσι ώστε να κρίνεται με περισσότερη ακρίβεια η κατάσταση μιας κατασκευής, καθώς οι ρωγμές μπορεί να προϋπάρχουν σαν ατέλειες μέσα σε ένα υλικό με τη μορφή μικρορωγμών ή να δημιουργούνται κατά την κόπωση.

2.2 Μηχανική της Θραύσης σε ρηγματωμένα στοιχεία

Η ανάγκη μελέτης του φαινομένου της κόπωσης των κατασκευών για ρηγματωμένα στοιχεία (ή στοιχεία με εγκοπές) προήλθε από δυο κυρίως διαπιστώσεις:

- Οι ρωγμές που περιέχονται σε μια κατασκευή η οποία καταπονείται δυναμικά, τείνουν να αυξάνουν σε μήκος λόγω της κόπωσης, της διάβρωσης, της ακτινοβολίας και άλλων αιτιών, και μάλιστα, επεκτείνονται όλο και ταχύτερα.
- Η αντοχή μιας κατασκευής μειώνεται όσο αυξάνουν και διαδίδονται οι ρωγμές μέσα στο υλικό, μετά δε από κάποιο διάστημα κόπωσης η αντοχή της γίνεται τόσο χαμηλή ώστε η κατασκευή αστοχεί.

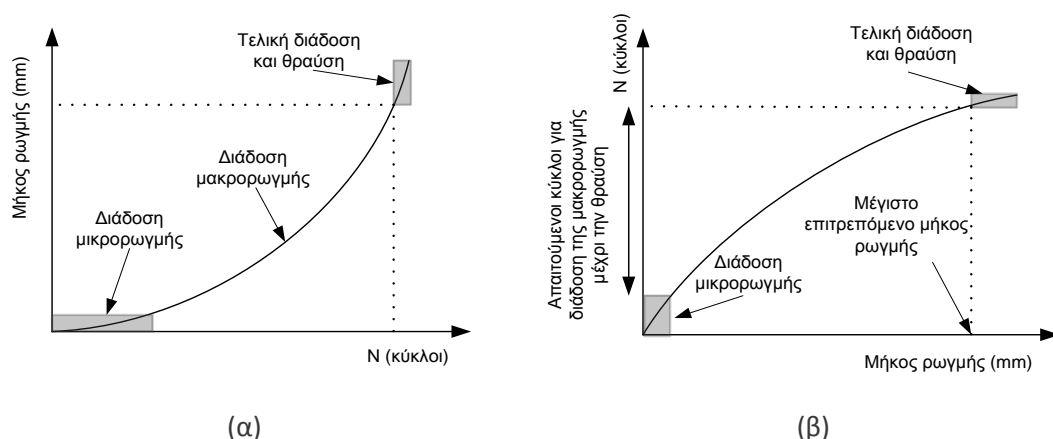
Το πρόβλημα απαρχής και διάδοσης της ρωγμής κατά την κόπωση στα υλικά με εγκοπές χωρίζεται σε 3 περιοχές: α) την περιοχή σχηματισμού της ρωγμής, β) την περιοχή επέκτασης της ρωγμής κοντά στην εγκοπή και γ) την περιοχή επέκτασης μακριά από την εγκοπή μέχρι την τελική θραύση. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται λόγω του ότι οι νόμοι που διέπουν τον αρχικό σχηματισμό της ρωγμής κοντά στην εγκοπή, είναι διαφορετικοί από αυτούς που διέπουν την διάδοσή της στο υπόλοιπο υλικό.



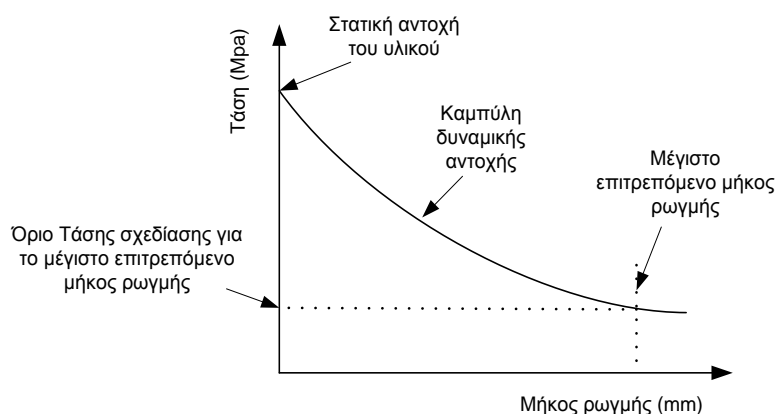
Εικόνα 3. Απαρχή (στάδιο I) και διάδοση ρήγματος στα υλικά (στάδιο II)

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6**, το αρχικό μέγεθος των ατελειών είναι πολύ μικρό για να είναι ορατό και η ρωγμή αρχίζει να επεκτείνεται χωρίς να γίνεται αντιληπτή. Από ένα σημείο και μετά η ρωγμή μπορεί να εντοπιστεί με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου. Το μέγεθός της αυξάνει με εκθετικό ρυθμό αλλά δεν έχει ακόμη προκαλέσει την αστοχία της κατασκευής. Όταν ξεπεράσει ένα κρίσιμο μέγεθος, επέρχεται η θραύση του υλικού και η αστοχία της κατασκευής. Το κρίσιμο μέγεθος της ρωγμής

εξαρτάται από τις εφαρμοζόμενες τάσεις. Στο **Σχήμα 7** παρατηρείται ότι όσο μικρότερες είναι οι τάσεις τόσο μεγαλύτερο είναι το επιτρεπόμενο μήκος των ρωγμών. Αντίθετα, αν οι εφαρμοζόμενες τάσεις είναι μεγάλες τότε απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή άρα και μικρότερα επιτρεπόμενα μήκη ρωγμών.



Σχήμα 6. (α) Αύξηση του μήκους ρωγμής με τη πάροδο των κύκλων φόρτισης. (β) Υπολειπόμενος χρόνος ζωής μέχρι το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ρωγμής



Σχήμα 7. Ελάττωση της αντοχής του υλικού λόγω αύξησης του μήκους ρωγμής

Η ύπαρξη λοιπόν γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως οπές, εγκοπές κ.τ.λ., έχουν μεγάλη επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού, για δύο κυρίως λόγους: α) κοντά στην ασυνέχεια υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση των τάσεων, δηλαδή οι τάσεις που επικρατούν τοπικά κοντά στην ασυνέχεια είναι πολύ υψηλότερες από ότι στο υπόλοιπο υλικό και β) η εντατική κατάσταση που επικρατεί γύρω από μία ασυνέχεια εμφανίζει τριαξονικότητα, δηλαδή γύρω από την ασυνέχεια επικρατεί μία σύνθετη εντατική κατάσταση. Στις περιπτώσεις αυτές υπεισέρχεται η έννοια του θεωρητικού ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων: $K_t = \sigma_{\text{τοπ}} / \sigma_{\text{μακρ}}$, όπου $\sigma_{\text{τοπ}}$ η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στην

αιχμή της ασυνέχειας και $\sigma_{\text{μακρ}}$ η τάση που καταπονεί το υλικό μακριά από την ασυνέχεια. Για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση αυτή, κατασκευάζονται δοκίμια του υλικού στα οποία δημιουργείται μηχανουργικά μία εγκοπή και τα οποία υποβάλλονται στη συνέχεια σε δοκιμές κόπωσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα του ίδιου υλικού, σε δοκίμια χωρίς εγκοπή.

Η σύγκριση τέτοιων πειραματικών αποτελεσμάτων έχει δείξει ότι η ύπαρξη της εγκοπής μειώνει δραματικά το όριο κόπωσης του υλικού, αλλά και την διάρκεια ζωής σε κόπωση για ένα δεδομένο εύρος τάσεων. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά σε διαγράμματα καμπυλών κόπωσης (σ -N) για ένα συγκεκριμένο υλικό με και χωρίς εγκοπή. Για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της εγκοπής στο όριο κόπωσης, έχει προταθεί η χρήση του συντελεστή κόπωσης με εγκοπή K_f (fatigue notch factor), όπου εκφράζει τον λόγο του ορίου κόπωσης ενός υλικού χωρίς εγκοπή προς το όριο κόπωσης του ίδιου υλικού με εγκοπή.

$$K_f = \frac{\text{όριο κόπωσης με εγκοπή}}{\text{όριο κόπωσης χωρίς εγκοπή}} \quad (1.8)$$

Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί και ο συντελεστής ευαισθησίας q (fatigue sensitivity factor), ο οποίος εκφράζει την επίδραση της εγκοπής σε κόπωση και υπολογίζεται ως:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (1.9)$$

Για $q=0$ (ή $K_f=1$) υποδηλώνεται μηδενική ευαισθησία εγκοπής, ενώ για $q=1$ (ή $K_f=K_t$) υποδηλώνεται μεγάλη ευαισθησία εγκοπής.

2.3 Πρόβλεψη της αστοχίας του υλικού και διάρκεια ζωής

Ο συντελεστής έντασης τάσεων K , είναι μια αρκετά σημαντική παράμετρος που ποσοτικοποιεί την ένταση του τασικού πεδίου και το μέγεθος της πλαστικής ζώνης στην αιχμή της ρωγμής. Η Γραμμική Ελαστική Θεωρία της μηχανικής των θραύσεων (LEFM) ορίζει ότι το μονοαξονικό τασικό πεδίο μπροστά από την αιχμή του ρήγματος είναι ανάλογο προς τον συντελεστή έντασης τάσεων K , σύμφωνα με την σχέση που περιγράφει η Εξ. 1.6. Καθώς λοιπόν η αστοχία του υλικού επέρχεται από επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις, δηλαδή από ένα επαναλαμβανόμενο εύρος τάσεων ($\Delta\sigma$), το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων μπορεί να οριστεί ως:

$$\Delta K = F \Delta_\sigma \sqrt{\pi \alpha} \quad (1.10)$$

Γνωρίζοντας το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων για συγκεκριμένο υλικό και συνθήκες, μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής του, ολοκληρώνοντας την Εξ. 1.7 μεταξύ των ορίων των αρχικών και των τελικών διαστάσεων μιας ρωγμής.

Για παράδειγμα, αν η διάδοση της ρωγμής περιγράφεται αναλυτικά από τη σχέση:

$$\frac{d\alpha}{dN} = C(\Delta K)^m = C(F \Delta_\sigma \sqrt{\pi \alpha})^m \quad (1.11)$$

ολοκληρώνοντας, από την αρχική ρωγμή α_0 (εντοπισμού) με αρχικούς κύκλους φόρτισης N_1 , έως την τελική ρωγμή α_{cr} , υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται έτσι ώστε η ρωγμή μήκους α_0 να γίνει α_{cr} :

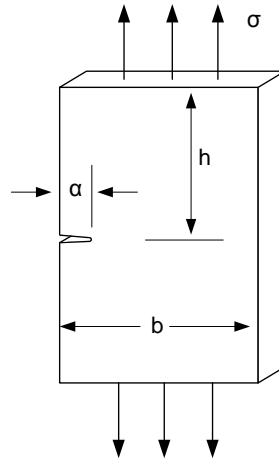
$$N_{\delta\alpha\delta} = \frac{\alpha_{cr}^{1-\frac{m}{2}} - \alpha_0^{1-\frac{m}{2}}}{C(F \Delta_\sigma \sqrt{\pi})^m \left(1 - \frac{m}{2}\right)} \quad (1.12)$$

Η Εξ. 1.12 είναι η γενικευμένη ολοκλήρωση της εξίσωσης του Paris όταν η συνάρτηση F είναι ανεξάρτητη του μήκους της ρωγμής α , και $n \neq 2$. Η εξίσωση αυτή όμως δεν καταλήγει πάντα σε ορθά προβλέψιμα αποτελέσματα για την διάρκεια ζωής όταν ο συντελεστής F είναι συνάρτηση του μήκους α .

Εκτεταμένη ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για την προσέγγιση του συντελεστή F σε διάφορες γεωμετρίες δοκιμίων με προϋπάρχουσες ρωγμές. Για την συγκεκριμένη περίπτωση που απασχολεί την παρούσα εργασία, όπως είναι αυτή του δοκιμίου με πλευρική ρωγμή, ο συντελεστής F προσεγγίζεται ως [18]:

$$F = \left(1 + 0.122 \cos^4 \frac{\pi \alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi \alpha} \tan \frac{\pi \alpha}{2}} \quad (1.13)$$

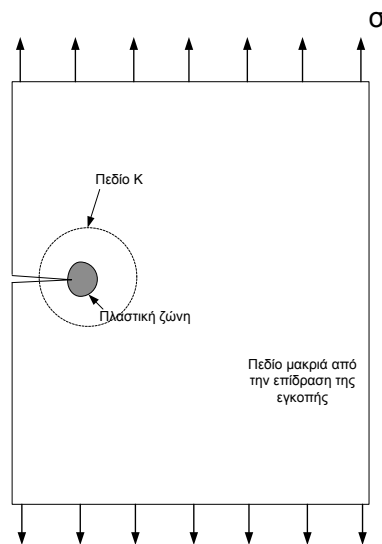
Όπου γενικά ισχύει για $h/b \geq 2$ στο **Σχήμα 8**.



Σχήμα 8. Προσέγγιση του συντελεστή F για δοκίμιο με πλευρική ρωγμή [18]

2.4 Όρια της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας

Όσο η ρωγμή βρίσκεται σε ένα ομογενές εντατικό πεδίο, ο συντελεστής K μπορεί να προσεγγιστεί με αρκετά καλή ακρίβεια [19,20]. Ωστόσο, για πολύπλοκα εντατικά πεδία η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη.



Σχήμα 9. Πλαστική ζώνη ρωγμής και μέγεθος πεδίου K ώστε να ισχύει η Γραμμική Ελαστική Θεωρία

Όταν η πλαστική ζώνη περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή γύρω από την αιχμή της ρωγμής και το πεδίο K είναι κατά πολύ μεγαλύτερο της πλαστικής περιοχής μπορούν να εφαρμοστούν οι αρχές της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας (**Σχήμα 9**). Σε αντίθετη περίπτωση όπου η πλαστική ζώνη είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με το μήκος της ρωγμής ή σε

σύγκριση με την απομένουσα διατομή, τότε η Γραμμική Ελαστική Θεωρία θα οδηγήσει σε σφάλμα και πρέπει να χρησιμοποιηθεί η Ελαστική -Πλαστική Θεωρία.

Πιο συγκεκριμένα, για την εφαρμογή των αρχών που διέπουν την Γραμμική Ελαστική Θεωρία έχει προταθεί ένα γενικό όριο που συνδέει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων και της ρωγμής με τον συντελεστή έντασης τάσεων K . Το όριο αυτό με βάση το **Σχήμα 8** είναι [18]:

$$\alpha, (b - \alpha), h \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K}{\sigma} \right)^2 \quad (1.14)$$

Η ανισότητα που περιγράφει η Εξ. 1.14 πρέπει να ικανοποιείται και για τις τρεις διαστάσεις α , $b - \alpha$, h . Διαφορετικά, η εντατική κατάσταση που επικρατεί κοντά στην αιχμή της ρωγμής επιφέρει φαινόμενα έντονης πλαστικής διαρροής και πλέον η πλαστική ζώνη υπερκαλύπτει σε μέγεθος το πεδίο K .

2.5 Υπολογιστικά μοντέλα πρόβλεψης N_f , $N_{ΕΚΚ}$ και $N_{διαδ}$

Από την αρχή της παρατήρησης του φαινομένου της κόπωσης στα υλικά μέχρι και σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά μοντέλα πρόβλεψης, τα οποία λαμβάνουν διαφορετικά κριτήρια υπ' όψιν, εστιάζοντας στην μελέτη της εκτίμησης της συνολικής διάρκειας ζωής, της έναρξης και της διάδοσης της ρωγμής κατά την κυκλική φόρτιση στοιχείων με εγκοπές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά 4 από τα μοντέλα αυτά.

Μοντέλο ονομαστικής τάσης (nominal stress approach): Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, χρησιμοποιείται η ονομαστική τάση (σ_{nom}) για να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής δοκιμίων με εγκοπές, με κριτήρια το πλάτος των τάσεων και την τιμή της μέσης τάσης [21]. Χρησιμοποιείται στην μελέτη του φαινομένου της κόπωσης κυρίως για φορτίσεις με τυχαίο προφίλ. Οι τάσεις ανάγονται συνεχώς σε τάσεις με μηδενική μέση τάση και χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις (Νόμος Basquin, Paris) για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής και της εξέλιξης της ρωγμής. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην θεωρία LEFM.

Μοντέλο τοπικής παραμόρφωσης (local strain approach): Το μοντέλο τοπικών παραμορφώσεων μελετά την επέκταση της ρωγμής λαμβάνοντας υπ' όψιν τις πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και τις παραμένουσες τάσεις κατά την κόπωση των υλικών [22]. Η

αύξηση της τοπικής τάσης στην περιοχή της εγκοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να προσδιοριστεί ο αριθμός των κύκλων που απαιτούνται για τη δημιουργία της ρωγμής.

Μοντέλο τάσης εγκοπής (notch stress concept): Στο μοντέλο τάσης εγκοπής, δεν λαμβάνονται υπ' όψιν πλαστικές παραμορφώσεις που μπορεί να λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της κόπωσης. Η μόνη επιρροή, είναι αυτή που προκαλείται από την εγκοπή, και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τοπικής τάσης στην περιοχή γύρω από αυτή.

Μοντέλο επέκτασης ρωγμής (crack growth approach): Το μοντέλο επέκτασης ρωγμής προβλέπει τον ρυθμό επέκτασης της ρωγμής μελετώντας την τάση ανοίγματος και κλεισίματος της ρωγμής. Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε η σχέση μεταξύ των δύο φαινομένων και αναπτύχθηκαν μοντέλα που δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα ως προς την διάρκεια ζωής κατασκευαστικών στοιχείων με εγκοπές.

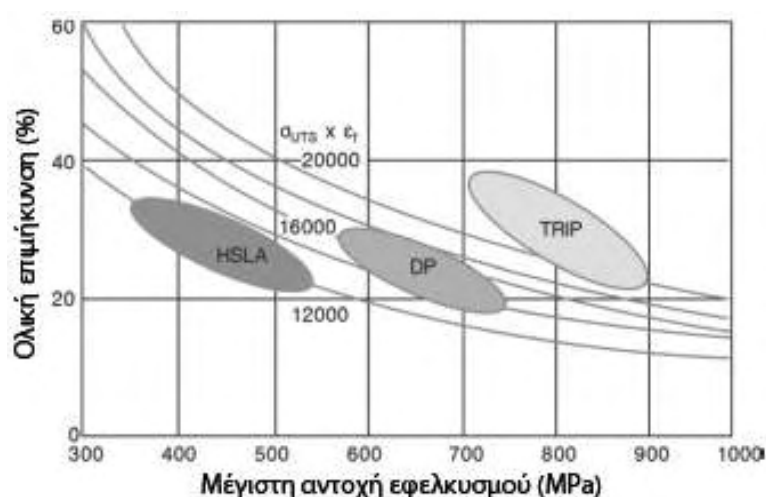
3. Χάλυβες στην αυτοκινητοβιομηχανία

3.1 Γενικά

Η τρέχουσα τάση για την παραγωγή αυτοκινήτων 'φιλικών' προς το περιβάλλον, αυξάνει την αναγκαιότητα ανάπτυξης πρωτότυπων τύπων χαλύβων που θα έχουν υψηλή αντοχή και θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευαστικά στοιχεία με μικρότερα πάχη για την ελάττωση του βάρους της δομής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα χαλύβων υψηλής αντοχής που χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία είναι οι χάλυβες DP και οι χάλυβες TRIP.

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής (HSS) χρησιμοποιούνται κατά παράδοση στην βιομηχανία αυτή και σε αυτούς περιλαμβάνονται ποιότητες χαλύβων C- Mn, διφασικοί χάλυβες (Dual Phase steels) και ποιότητες χαλύβων υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης (High Strength Low Alloy).

Στο **Σχήμα 10** πραγματοποιείται σε διάγραμμα ϵ - σ_{UTS} , σύγκριση των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων τύπων χαλύβων στην αυτοκινητοβιομηχανία σήμερα. Είναι φανερό ότι οι χάλυβες TRIP εξασφαλίζουν έναν αρκετά καλό συνδυασμό αντοχής και διαμορφωσιμότητας από τους χάλυβες υψηλής αντοχής χαμηλής κραμάτωσης και τους διφασικούς χάλυβες.



Σχήμα 10. Χαρακτηριστικά χαλύβων υψηλής αντοχής

3.2 Χάλυβες DP (Dual Phase Steels)

3.2.1 Χαρακτηριστικά χαλύβων DP

Οι χάλυβες Dual Phase από μικροδομική άποψη, αποτελούνται από μίγμα δύο φάσεων, φερρίτη και μαρτενσίτη. Ο μαλακός φερρίτης σαν μητρική φάση σε συνδυασμό με την πυκνή διασπορά της σκληρής μαρτενσιτικής φάσης μπορεί να προσδώσει στον χάλυβα εξαιρετικές ιδιότητες. Βέβαια, η αντοχή των χαλύβων αυτών είναι ανάλογη του ποσοστού του μαρτενσίτη που περιέχουν. Η παρουσία της φερριτικής φάσης δεν επιτρέπει στον χάλυβα έχει υψηλό όριο διαρροής αλλά παράλληλα, λόγω του μαρτενσίτη, μπορεί να υφίσταται μεγάλη εργοσκληρυνση.

Τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά οδηγούν σε σταθεροποίηση της πλαστικής ροής και σε μεγάλες ομοιόμορφες παραμορφώσεις με αποτέλεσμα την αύξηση της διαμορφωσιμότητας.

3.2.2 Θερμική κατεργασία των χαλύβων DP

Η θερμική κατεργασία των διφασικών χαλύβων περιλαμβάνει ενδοκρίσιμη ανόπτηση στην διφασική περιοχή $\alpha + \gamma$ (όπου υπάρχει πλέον φερρίτης και ωστενίτης), μεταξύ των θερμοκρασιών A1 και A3 (θερμοκρασία μετασχηματισμού από φερρίτη σε ωστενίτη αντίστοιχα). Κατά την διάρκεια της ανοπτήσεως, ο άνθρακας διαχέεται στον ωστενίτη αυξάνοντας έτσι την εμβαπτότητά του. Στη συνέχεια, κατά την απότομη ψύξη στη θερμοκρασία δωματίου (βαφή), ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη.

3.3 Χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity Steels)

Οι χάλυβες TRIP είναι υποευτηκτοειδή κράματα Fe-C, που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.12-0.20% κατά βάρος. Αποτελούνται συνήθως από τρεις φάσεις: φερρίτη, μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη. Ο παραμένων ωστενίτης βρίσκεται υπό την μορφή διασποράς σωματιδίων στον χάλυβα. Κατά την ψυχρή διαμόρφωση των χαλύβων αυτών, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Οι πολυφασικοί αυτοί χάλυβες είναι μιας νέας γενιάς χάλυβες υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωνσης, που παρουσιάζουν συνδυασμό αυξημένης αντοχής και ολκιμότητας, ικανοποιώντας έτσι τις σύγχρονες απαιτήσεις τις αυτοκινητοβιομηχανίας.

3.3.1 Χαρακτηριστικά χαλύβων TRIP

Οι χάλυβες TRIP, έχουν πλέον εκτεταμένη εφαρμογή στην βιομηχανία αυτοκινήτων λόγω:

- εξαιρετικού συνδυασμού αντοχής σε θραύση και ολκιμότητας,
- δυσθραυστότητας,
- διαμορφωσιμότητας.

Η χρήση χαλύβων TRIP επιτρέπει την ελάττωση του πάχους των χαλύβδινων μερών ενός αυτοκινήτου, χωρίς αυτό να αντιστοιχεί σε επακόλουθη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στην κατασκευή ελαφρύτερων οχημάτων που συνεπάγεται χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων. Οι χάλυβες TRIP, λόγω της καλής ισορροπίας αντοχής και ολκιμότητας, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μερών του οχήματος τα οποία είναι πιο ευάλωτα σε περίπτωση σύγκρουσης.



Εικόνα 4. Χαλύβδινα μέρη οχήματος

Είναι ιδιαίτερος σύνθετα υλικά με εν δυνάμει μεταβλητό όγκο κλασμάτων των επιμέρους φάσεων. Οι χάλυβες TRIP μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- Πλήρως ωστενιτικοί
- Πολυφασικοί με χαμηλή κραμάτωση

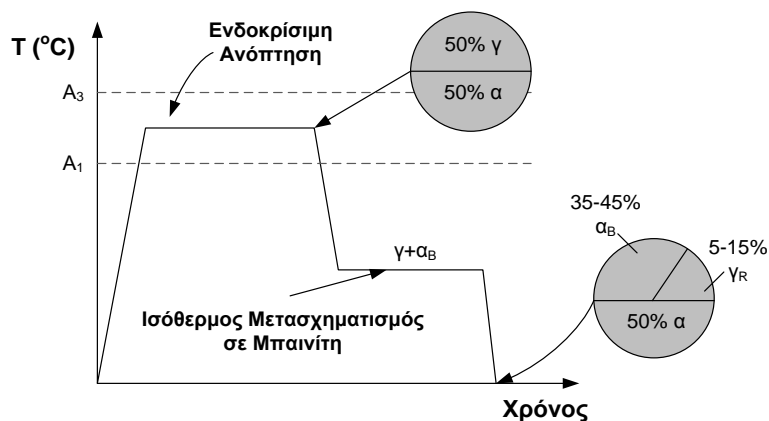
Οι πρώτοι διακρίνονται για την εξαιρετική δυσθραυστότητα που διαθέτουν. Το τριαξονικό πεδίο των τάσεων μπροστά από την αιχμή μιας ρωγμής, προκαλεί τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό του ωστενίτη και η πλαστικότητα του μετασχηματισμού οδηγεί σε αύξηση της δυσθραυστότητας. Η δεύτερη κατηγορία χαλύβων TRIP διακρίνεται

για την εξαιρετική διαμορφωσιμότητα που προσφέρουν, μιας και το φαινόμενο πλαστικότητας του μετασχηματισμού συνοδεύεται από σταθεροποίηση της πλαστικής ροής, με συνέπεια την αύξηση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης.

Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη των χαλύβων την τελευταία δεκαετία έχει δείξει ότι οι TRIP χάλυβες κατά την διαμόρφωσή τους σε ελάσματα, συνιστούν μια νέα κατηγορία ελασμάτων ή χαλυβόφυλλων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέον για να παραχθούν ακόμη πιο περίπλοκα και εξειδικευμένα μηχανολογικά στοιχεία σε σχέση με τους υπόλοιπους χάλυβες υψηλής αντοχής.

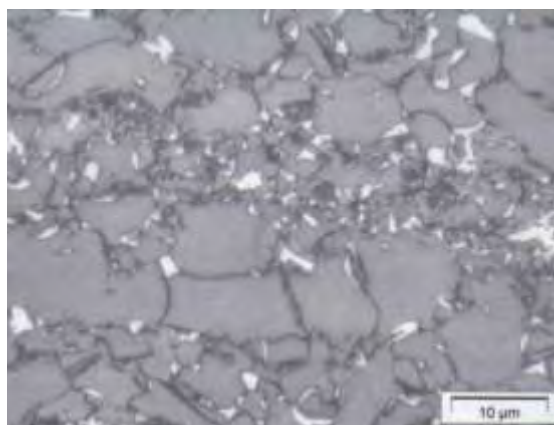
3.3.2 Θερμική κατεργασία χαλύβων TRIP

Όσον αφορά στην θερμική κατεργασία για την τελική διαμόρφωση της μικροδομής των χαλύβων TRIP, είναι αρκετά σημαντικό να εξασφαλίζεται η μεγάλη διασπορά της ωστενιτικής φάσης σε θερμοκρασία δωματίου. Τα στάδια της θερμικής κατεργασίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 11**. Η αρχική μικροδομή ενός χάλυβα TRIP είναι φερριτοπερλιτική, αποτελείται δηλαδή από φερρίτη και περλίτη. Ο χάλυβας υφίσταται ενδοκρίσιμη ανόπτηση, μεταξύ των θερμοκρασιών A1 και A3, για τον σχηματισμό μίγματος φερρίτη και ωστενίτη (περιοχή $\alpha + \gamma$) σε ποσοστά περίπου 50%. Στη συνέχεια ο χάλυβας φέρεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την A₁, με σκοπό να πραγματοποιηθεί ισόθερμος μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινίτη. Κατά την διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού, ο άνθρακας που αποβάλλεται, εμπλουτίζει τον υπολειπόμενο ωστενίτη. Η ισόθερμη παραμονή σε αυτή τη θερμοκρασία διακόπτεται λίγο πριν ολοκληρωθεί ο μπαινιτικός μετασχηματισμός για να παραμείνει ένα ποσοστό της τάξεως του 10% περίπου ωστενίτης. Ο ωστενίτης που έχει παραμείνει λοιπόν, κατά την ψύξη του χάλυβα σε θερμοκρασία δωματίου, δεν μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη, διότι είναι πλέον μια σταθεροποιημένη φάση λόγω του εμπλουτισμού σε άνθρακα που έχει υποστεί. Αυτό το ποσοστό του παραμένοντα ωστενίτη, είναι υπεύθυνο για την εμφάνιση του φαινομένου TRIP κατά την ψυχρή διαμόρφωση του χάλυβα και οδηγεί σε αύξηση της διαμορφωσιμότητας.



Σχήμα 11. Στάδια θερμικής κατεργασίας χαλύβων TRIP

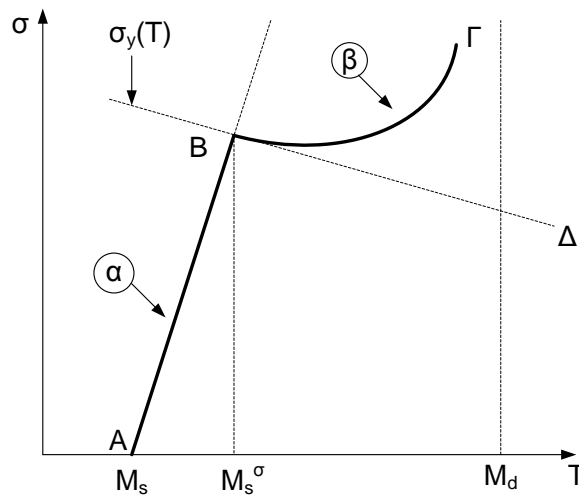
Μία τυπική μικροδομή ενός χάλυβα TRIP φαίνεται στην **Εικόνα 5**, όπου με έντονο λευκό χρώμα διακρίνονται τα διάσπαρτα σωματίδια του παραμένοντα ωστενίτη.



Εικόνα 5. Τυπική μικροδομή χάλυβα TRIP. Με λευκό χρώμα απεικονίζεται ο παραμένων ωστενίτης.

3.3.3 Πλαστικότητα μετασχηματισμού

Λόγω του ισχυρού διατμητικού χαρακτήρα των παραμορφώσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα που προκαλούνται από τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, συμβαίνουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις όταν εφαρμόζονται εξωτερικές φορτίσεις στο υλικό. Οι μηχανικές επιδράσεις (με την μορφή τάσεων ή παραμορφώσεων) που προκαλούν τον μαρτενσιτικό μηχανισμό παρουσιάζονται στο **Σχήμα 12**.



Σχήμα 12. Σχηματική παράσταση μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υποβοηθούμενου από την τάση α και προκαλούμενου από την παραμόρφωση β

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, υπό μηδενική εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση εκκινεί σε προϋπάρχουσες θέσεις πυρήνωσης κατά την ψύξη σε θερμοκρασία M_s . Χωρίς αύξηση της θερμοκρασίας, είναι δυνατόν να προκληθεί πυρήνωση και ανάπτυξη, δηλαδή να εκκινήσει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, με την επιβολή τάσης κάτω από το όριο διαρροής της μητρικής φάσης (τμήμα AB στο **Σχήμα 12**). Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία πάνω από την M_s , τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που απαιτείται για την πυρήνωση των σωματιδίων του μαρτενσίτη. Στη θερμοκρασία M_s^σ , η τάση φθάνει το όριο διαρροής της μητρικής φάσης σ_y , του οποίου η θερμοκρασιακή εξάρτηση αποτυπώνεται με το τμήμα BD στο **Σχήμα 12**. Λόγω της πλαστικής πλέον παραμόρφωσης, σχηματίζονται νέες και πιο δυναμικές θέσεις πυρήνωσης της μαρτενσιτικής φάσης. Για τον λόγο αυτό η τάση που απαιτείται για την μαρτενσιτική πυρήνωση, δεν ακολουθεί την προέκταση το τμήματος AB , αλλά την $B\Gamma$.

4. Πειραματική διαδικασία

4.1 Στόχοι

Με την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, εξήχθησαν χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν:

- Στη συμπεριφορά πολυκυκλικής κόπωσης του χάλυβα TRIP 700.
- Στον προσδιορισμό των σταθερών του νόμου Basquin για τους χάλυβες TRIP 700 και DP 500, με σκοπό την πρόβλεψη της συνολικής διάρκειας ζωής (N_f).
- Στην επίδραση της εγκοπής στην συνολική διάρκεια ζωής του χάλυβα TRIP 700, και κατ' επέκταση στον προσδιορισμό του συντελεστή κόπωσης q (fatigue sensitivity factor).
- Στον προσδιορισμό των σταθερών Paris για τους χάλυβες TRIP 700 και DP 500, κατά την μελέτη του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής σε δοκίμια με εγκοπή, με σκοπό την πρόβλεψη του αριθμού κύκλων που απαιτούνται για την διάδοση της ρωγμής μέχρι την θραύση ($N_{\delta\alpha\delta}$).
- Στην πρόβλεψη του αριθμού κύκλων που απαιτούνται για την εκκίνηση της ρωγμής στον χάλυβα TRIP 700, δεδομένων των νόμων Basquin και Paris ($N_{\text{ΕΚΚ}}=N_f-N_{\delta\alpha\delta}$).

4.2 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6** και αποτελείται από τρία κύρια τμήματα. Την υδραυλική αντλία λαδιού, το πλαίσιο φόρτισης με το κινούμενο έμβολο και τις αρπάγες συγκράτησης των δοκιμίων και την ηλεκτρονική μονάδα.

Πρόκειται για ένα σύστημα ελέγχου μηχανικών δοκιμών κλειστού βρόχου, όπου οι εντολές για κίνηση του εμβόλου από τον χρήστη μεταφέρονται σαν ηλεκτρικό σήμα από την κονσόλα στην αντλία λαδιού, η οποία με την σειρά της κινεί το έμβολο στο πλαίσιο φόρτισης.



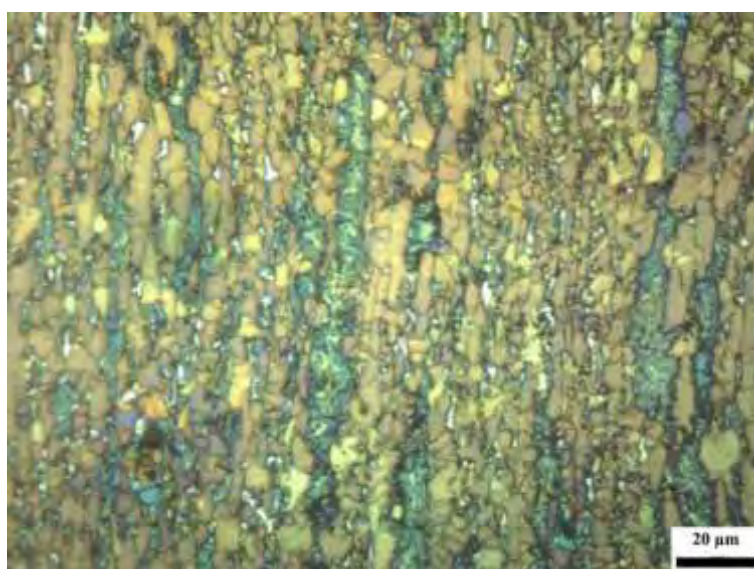
Εικόνα 6. Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού Instron του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών

4.3 Υλικά δοκιμών

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μηχανικών δοκιμών ήταν ελάσματα από χάλυβα TRIP 700 θερμής έλασης ονομαστικού πάχους 1.85mm. Τα κύρια κραματικά στοιχεία του χάλυβα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

Πίνακας 1. Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled (κατά βάρος %)

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>
0.18	1.61	1.45	0.7	Balance

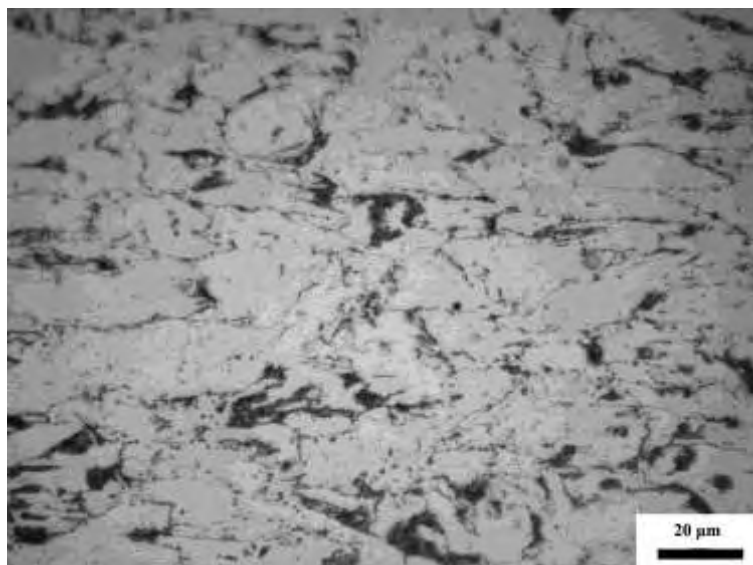


Εικόνα 7. Μικροδομή χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled (x1000) [25]

Παράλληλα, για την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία προγενέστερης μελέτης για τον χάλυβα θερμής έλασης Dual Phase 500 Full Hard, του οποίου τα κύρια κραματικά στοιχεία παρουσιάζονται παρακάτω [23].

Πίνακας 2. Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα DP 500 Cold Rolled Full Hard(κατά βάρος %)

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>
0.075	1.44	0.48	Balance



Εικόνα 8. Μικροδομή χάλυβα DP 500 Cold Rolled Full Hard (x1000)

4.4 Προετοιμασία δοκιμών

Όλα τα δοκίμια κόπηκαν παράλληλα στην διεύθυνση της έλασης, καθώς κατά την διεύθυνση αυτή ο χάλυβας έχει αποκτήσει μεγαλύτερη αντοχή και καλύτερες ιδιότητες. Συνολικά, κατά την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια εφελκυσμού (**Εικόνα 9**), 14 δοκίμια κόπωσης χωρίς εγκοπή (**Εικόνα 10**) και 10 δοκίμια κόπωσης με εγκοπή.

Προτού γίνουν τα πειράματα εφελκυσμού και κόπωσης, πραγματοποιήθηκαν κατεργασίες λείανσης στα δοκίμια με γυαλόχαρτα καρβιδίου- σιλικόνης D#500 D#800 και D#1000, ούτως ώστε να περιοριστούν οι ατέλειες των επιφανειών, όπως γρέζια από την κοπή.

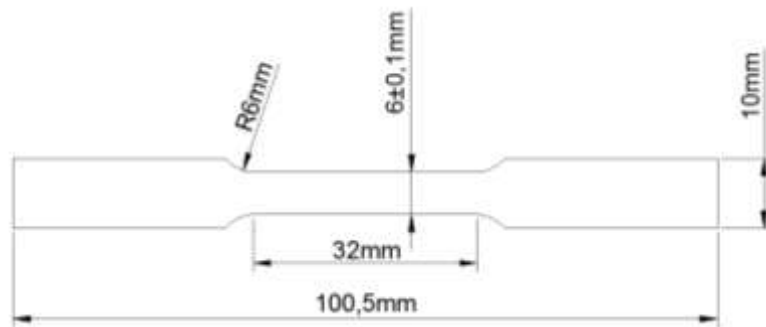


Εικόνα 9. Δοκίμια εφελκυσμού



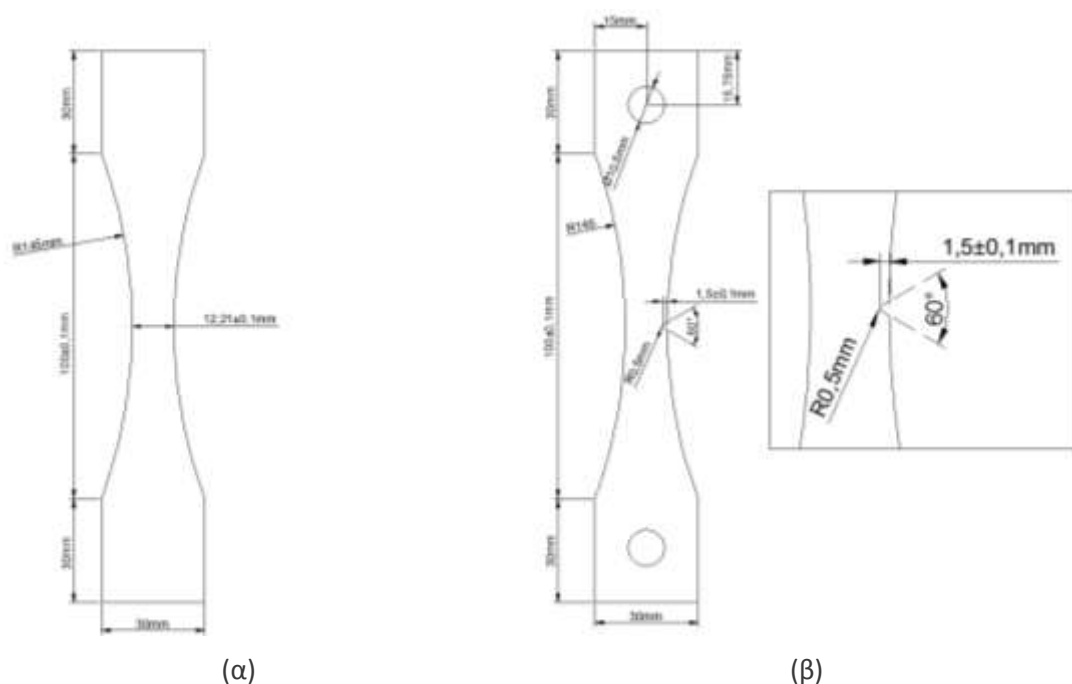
Εικόνα 10. Δοκίμιο κόπωσης χωρίς εγκοπή

Τα 3 δοκίμια εφελκυσμού κόπηκαν και επεξεργάστηκαν μηχανουργικά σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 8 M. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων εφελκυσμού παρουσιάζονται στο **Σχήμα 13**.



Σχήμα 13. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου εφελκυσμού (ASTM E 8 M)

Όσον αφορά στα πειράματα κόπωσης, τα δοκίμια κόπηκαν και επεξεργάστηκαν μηχανουργικά σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 466. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων κόπωσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 14**.



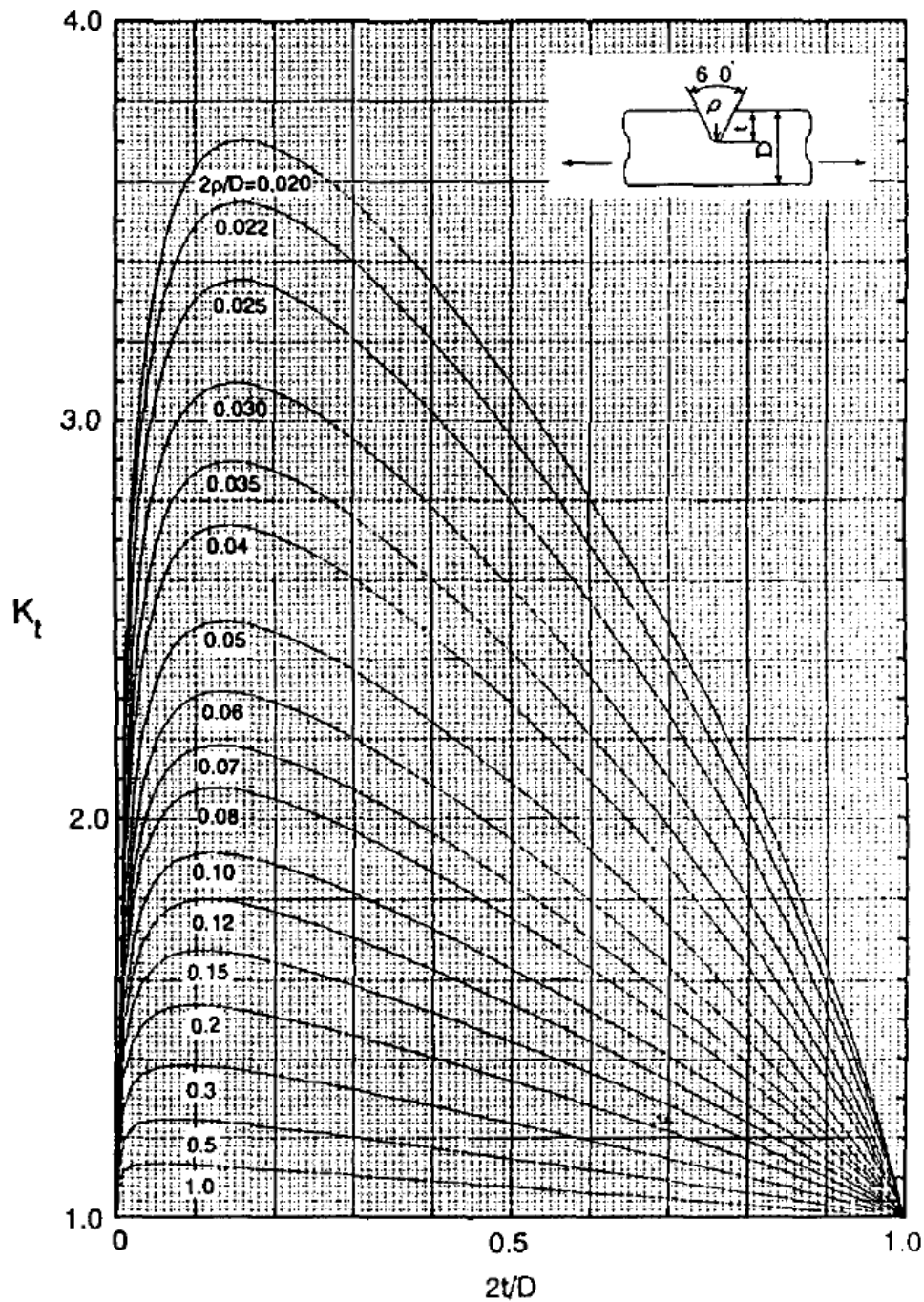
Σχήμα 14. (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων κόπωσης χωρίς εγκοπή και (β) με εγκοπή (ASTM E 466)

Η προδιαγραφή ASTM E 466 για πειράματα κόπωσης σε δοκίμια με πλευρική εγκοπή προβλέπει την χρήση συνθηκών στήριξης με ελεύθερη περιστροφή στις αρπάγες της μηχανής. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν οπές εκατέρωθεν της εγκοπής στα πέλματα των δοκιμίων με σκοπό να προσαρτηθούν πάνω σε ειδική ιδιοσυσκευή συγκράτησης (**Εικόνα 11**).



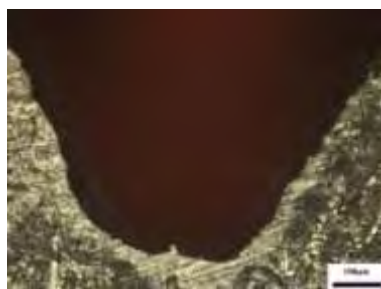
Εικόνα 11. Δοκίμιο κόπωσης με εγκοπή στην μηχανή εφελκυσμού

Η γεωμετρία της εγκοπής οφείλει να έχει πολύ συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καθώς καθορίζει των ελαστικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t . Ο συντελεστής αυτός είναι ουσιαστικά ένας πολλαπλασιαστικός συντελεστής, όπου υπολογίζει την τοπική τάση στην εγκοπή δεδομένης της μακροσκοπικής εφαρμοζόμενης τάσης. Η σχέση που συνδέει την τοπική τάση $\sigma_{τοπ}$ στην εγκοπή και την μακροσκοπική τάση $\sigma_{μακρ}$ είναι γενικά: $\sigma_{τοπ} = K_t \cdot \sigma_{μακρ}$. Στην **Εικόνα 12** που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή K_t συναρτήσει του λόγου $2t/D$, όπου t το βάθος της εγκοπής και D το πλάτος διατομής του πρισματικού δοκίμιου, για επίπεδα δοκίμια με πλευρική εγκοπή που υπόκεινται σε αξονική φόρτιση.

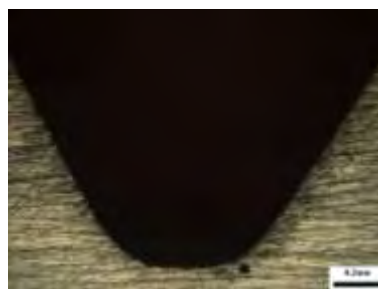


Εικόνα 12. Διάγραμμα K_t συναρτήσει του λόγου $2t/D$, για επίπεδα δοκίμια [24]

Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε γεωμετρία εγκοπής που να αντιστοιχεί σε τιμή ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσης $K_t=2.2$



(α)



(β)

Εικόνα 13. Γεωμετρία εγκοπής Δοκιμίου3. (α) Όπως παραλήφθηκε από το μηχανουργείο, (β) μετά τις κατεργασίες λείανσης και καθαρισμού

Για την επαλήθευση των τιμών του K_t μετά την μηχανουργική κατεργασία, πραγματοποιήθηκε, για το σύνολο των δοκιμών κόπωσης με εγκοπή, λείανση των επιφανειών (**Εικόνα 13**). Έπειτα, με τη χρήση ειδικού λογισμικού υπολογίστηκαν οι ακριβείς διαστάσεις των εγκοπών. Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και υπολογίζεται ο ελαστικός συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_t για κάθε ένα εξ αυτών χρησιμοποιώντας δεδομένα από την **Εικόνα 12**.

Πίνακας 3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών με εγκοπή και υπολογισμός του ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t

Δοκίμιο	Βάθος εγκοπής, t (mm)	Ακτίνα καμπυλότητας, ρ (°)	$2\rho/D$	$2t/D$	K_t
1	-	-	-	-	-
2	2	0.37	0.06	0.325	2.18
3	1.66	0.4	0.065	0.275	2.18
4	1.72	0.37	0.06	0.279	2.23
5	1.77	0.37	0.06	0.288	2.22
6	1.66	0.4	0.065	0.268	2.18
7	1.57	0.4	0.065	0.254	2.18
8	1.84	0.43	0.07	0.299	2.22
9	1.71	0.37	0.06	0.278	2.23
10	1.63	0.37	0.06	0.265	2.23

4.5 Πειράματα εφελκυσμού

Τα πειράματα εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στην μηχανή εφελκυσμού του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών, είχαν ως σκοπό τον προσδιορισμό της ονομαστικής καμπύλης τάσης –παραμόρφωσης του χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled και την

αποτίμηση στη συνέχεια των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Συγκεκριμένα αποτιμήθηκαν, το όριο θραύσης ή αντοχή εφελκυσμού σ_{UTS} , το συμβατικό όριο διαρροής $\sigma_{y0.2}$ όπως επίσης και συνολική παραμόρφωση θραύσης ϵ_f .

4.6 Πειράματα κόπωσης

Τα πειράματα κόπωσης των δοκιμών χωρίς εγκοπή όπως και των δοκιμών με εγκοπή πραγματοποιήθηκαν με σταθερό λόγο τάσεων $R=0.1$ και συχνότητα 25Hz. Για τα 14 δοκίμια κόπωσης χωρίς εγκοπή επιλεγόταν κάθε φορά η τιμή της μέγιστης εφαρμοζόμενης τάσης και καταγράφονταν ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία, με σκοπό να προσδιοριστεί η καμπύλη κόπωσης ($\sigma-N$) του υλικού και να εντοπιστεί το συμβατικό όριο κόπωσης. Γενικά για τους χάλυβες θεωρείται ότι όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση επέρχεται περίπου στους 10^6 - 10^7 κύκλους σε αντίθεση με τα κράματα του αλουμινίου όπου θεωρείται πως είναι της τάξεως των 10^7 - 10^9 κύκλων. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η διακοπή του πειράματος αν το δοκίμιο έφτανε τους $3 \cdot 10^6$ κύκλους χωρίς να έχει επέλθει η θραύση.

Στα πειράματα κόπωσης των δοκιμών με εγκοπή, η παρούσα μελέτη εστιάστηκε στην συμπεριφορά έναρξης και διάδοσης ρήγματος. Για τον προσδιορισμό της φάσης έναρξης ρωγμής αλλά και αύξησή της με τους κύκλους καταπόνησης στα εν λόγω δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε τεχνική αποτυπωμάτων ρέπλικας, για τον εντοπισμό της ρωγμής στην αιχμή της εγκοπής αλλά και του μήκους της. Τα πειράματα κόπωσης των δοκιμών με εγκοπή ήταν διακοπτόμενα καθώς έπρεπε να εφαρμοστεί κάποιου τύπου τεχνική μη καταστρεπτικού ελέγχου για τον εντοπισμό των ρωγμών.

Καθώς τα φορτία καταπόνησης ήταν συνεχώς εφελκυστικά, ο εντοπισμός των ρωγμών όφειλε να πραγματοποιηθεί όσο τα δοκίμια ήταν δεμένα στην μηχανή εφελκυσμού. Μια ενδεχόμενη αποφόρτιση, βγάζοντας το δοκίμιο από την μηχανή εφελκυσμού, θα εξομάλυνε το τασικό πεδίο μπροστά από την εγκοπή ή μπροστά από την αιχμή της ρωγμής αν είχε σχηματιστεί, με αποτέλεσμα να τροποποιηθεί το ιστορικό φόρτισης και η περεταίρω φορτίσεις να θεωρούνται ως υπερφορτίσεις για το υλικό.

Σύμφωνα με την τεχνική αποτυπωμάτων ρέπλικας, ανά τακτά χρονικά διαστήματα (σε πλήθος κύκλων φόρτισης), το πείραμα διακοπτόταν και ασκούσαν στο υλικό μια εφελκυστική δύναμη μέχρι η τιμή της τάσης να φτάσει λίγο πιο κάτω από την μέγιστη του πειράματος, με σκοπό αν έχει εμφανιστεί ρωγμή, να παραμείνει «ανοιχτή». Κατόπιν,

τοποθετούνταν στην αιχμή της εγκοπής ένα κομμάτι ρέπλικας με ειδική κόλλα και αποτυπώνονταν έτσι τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του δοκιμίου. Η διαδικασία της ρέπλικας επαναλαμβανόταν μέχρι να εντοπιστεί μια ρωγμή και έπειτα σε μικρότερα διαστήματα κύκλων λαμβάνονταν αποτυπώματα για την εξέλιξή της διάδοσής της. Τέλος, σημειώνονταν ο αριθμός των κύκλων που άντεξε το δοκίμιο με σκοπό να προσδιοριστεί η καμπύλη κόπωσης του υλικού με εγκοπή. Τα αποτυπώματα ρέπλικας που χρησιμοποιήθηκαν, μελετήθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο Leica του Εργαστηρίου Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

5. Αποτελέσματα

Η επισκόπηση των αποτελεσμάτων αποτελεί επί της ουσίας μια παρουσίαση της ροής των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη.

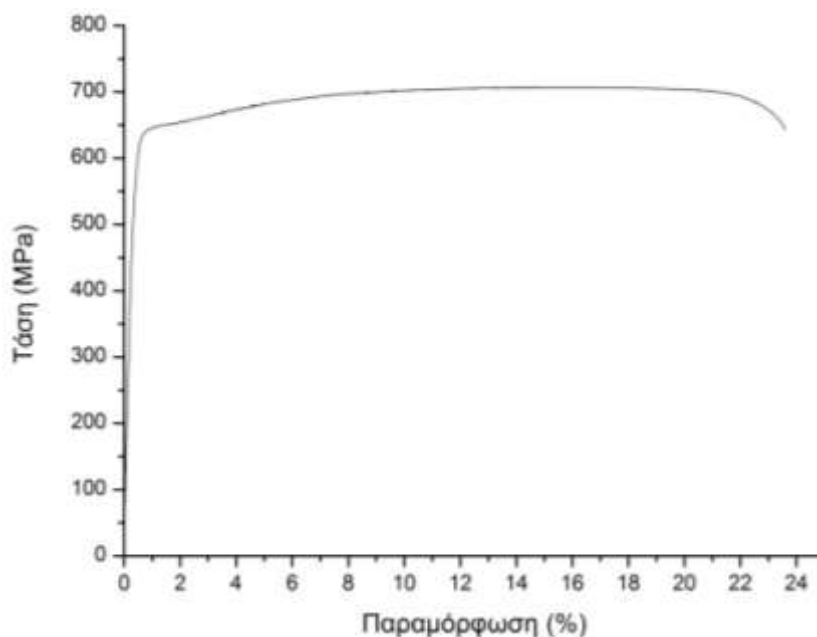


Σχήμα 15. Διάγραμμα ροής εργασιών της παρούσας μελέτης

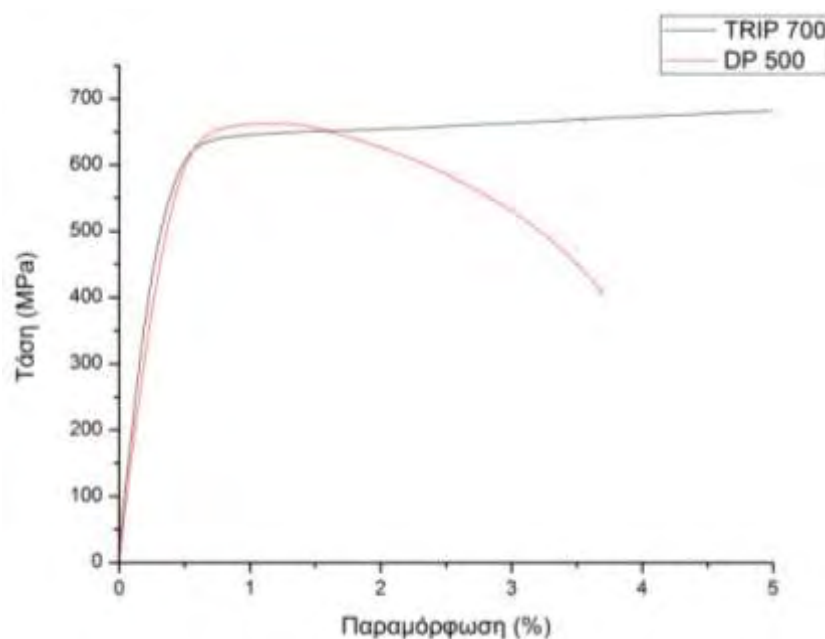
Αρχικά, στο πειραματικό κομμάτι, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού του χάλυβα TRIP 700 με σκοπό να αποτιμηθούν οι μηχανικές ιδιότητές του και να συγκριθούν με αυτές του χάλυβα DP 500. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκυκλικής κόπωσης για τον χάλυβα TRIP 700 και πραγματοποιείται σύγκριση με τα αποτελέσματα κόπωσης για τον χάλυβα DP 500. Από τα αποτελέσματα της πολυκυκλικής κόπωσης και για τα δύο υλικά (με και χωρίς εγκοπή), προσδιορίζονται οι δύο σταθερές της εμπειρικής σχέσης του Basquin: M και b . Παράλληλα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του μήκους ρωγμής σε όποια δοκίμια του χάλυβα TRIP 700 κατέσται δυνατό, μελετώντας τα αποτυπώματα ρέπλικας στο μικροσκόπιο και αξιολογείται ο «εικονικός» ρυθμός διάδοσης της ρωγμής σε συγκριτικό διάγραμμα da/dN - ΔK με τον χάλυβα DP 500. Από την αξιολόγηση του «εικονικού» ρυθμού διάδοσης της ρωγμής για τα δύο υλικά με εγκοπή, προσδιορίζονται οι δύο σταθερές της εμπειρικής σχέσης του Paris: C και m . Τέλος, στο αναλυτικό κομμάτι της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιώντας τις σταθερές M, b και C, m παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν στην πρόβλεψη της συνολικής διάρκειας ζωής (N_f), της εξέλιξης της ρωγμής ($N_{δαδ}$) και των κύκλων που απαιτούνται για την εκκίνηση της ρωγμής ($N_{εκκ}$) μέσω της αριθμητικής λύσης των δύο εμπειρικών νόμων.

5.1 Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού

Από την δοκιμή εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκε, λήφθηκε η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για τον χάλυβα TRIP 700, η οποία παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 1**. Η σύγκριση της συμπεριφοράς $\sigma - \epsilon$ και των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα TRIP 700 και του χάλυβα DP 500 [23] παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 2** και στον **Πίνακα 4** αντίστοιχα.



Διάγραμμα 1. Καμπύλη $\sigma - \epsilon$ χάλυβα TRIP 700



Διάγραμμα 2. Σύγκριση συμπεριφοράς $\sigma - \epsilon$ χαλύβων TRIP 700 και DP 500

Πίνακας 4. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των δύο υλικών

Υλικό	Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, σ_{UTS} (MPa)	Τεχνητό όριο διαρροής, $\sigma_{y0,2}$ (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης, ϵ_f (%)
TRIP 700	707	628	23.2
DP 500	671	635	3.7

5.2 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης

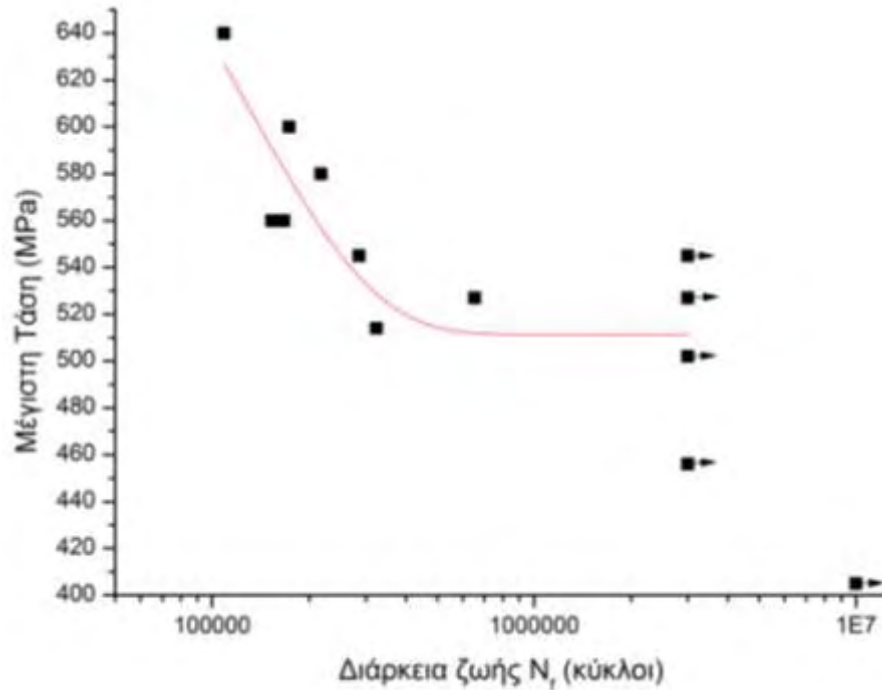
5.2.1 Δοκίμια χωρίς εγκοπή

Οι συνθήκες κόπωσης των 14 δοκιμών χωρίς εγκοπή του χάλυβα TRIP 700 και τα αποτελέσματα της συνολικής διάρκειας ζωής που προέκυψαν από τα πειράματα κόπωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5**.

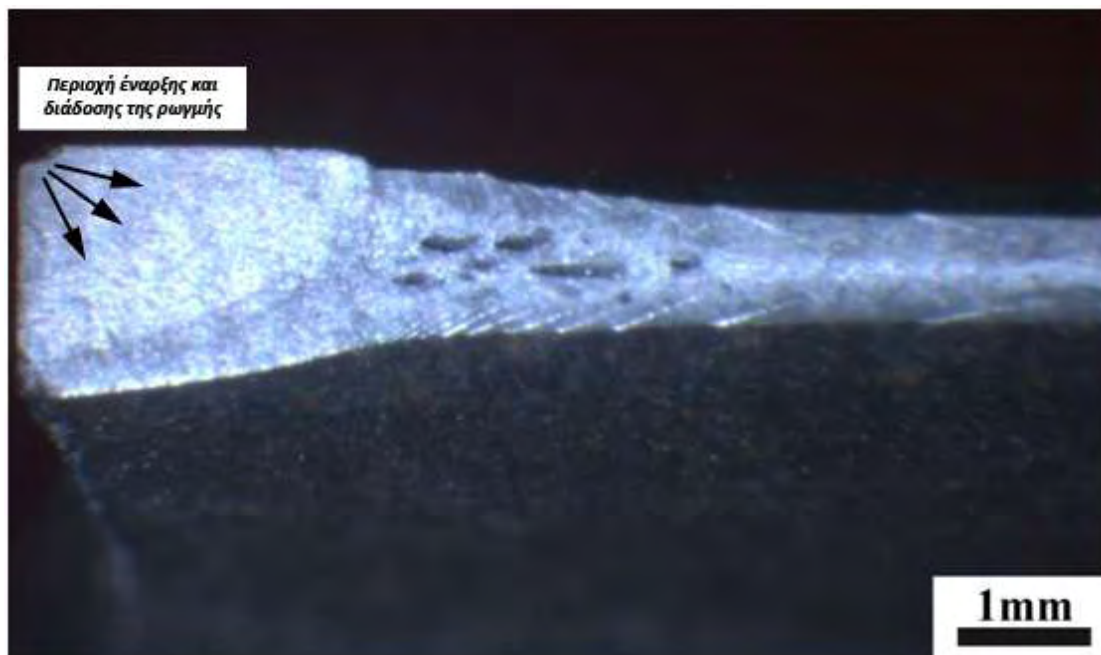
Πίνακας 5. Συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 χωρίς εγκοπή

Δοκίμιο	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	σ_{mean} (MPa)	σ_a (MPa)	F_{\max} (KN)	F_{\min} (KN)	F_{mean} (KN)	F_a (KN)	Αριθμός κύκλων μέχρι την θραύση
1	418	41.8	229.9	188.1	9.434	0.943	5.189	4.245	408899
2	405	40.5	222.75	182.25	9.141	0.914	5.027	4.113	Άντεξε 10^7 κύκλους
3	456	45.6	250.8	205.2	10.292	1.029	5.661	4.631	Άντεξε $3 \cdot 10^6$ κύκλους
4	514	51.4	282.7	231.3	11.601	1.16	6.381	5.22	324000
5	502	50.2	276.1	225.9	11.33	1.133	6.232	5.099	Άντεξε $3 \cdot 10^6$ κύκλους
6	527	52.7	289.85	237.15	11.894	1.189	6.542	5.352	653000
7	527	52.7	289.85	237.15	11.894	1.189	6.542	5.352	Άντεξε $3 \cdot 10^6$ κύκλους
8	600	60	330	270	13.553	1.355	7.454	6.099	173342
9	580	58	319	261	13.091	1.309	7.2	5.891	217796
10	560	56	308	252	12.795	1.279	7.037	5.758	153300
11	545	54.5	299.75	245.25	12.452	1.245	6.849	5.603	286137
12	640	64	352	288	14.622	1.462	8.042	6.58	108809
13	545	54.5	299.75	245.25	12.795	1.279	7.037	5.758	Άντεξε $3 \cdot 10^6$ κύκλους
14	560	56	308	252	13.14	1.314	7.227	5.913	167074

Από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 5** για την συνολική διάρκεια ζωής των δοκιμίων του χάλυβα TRIP 700 χωρίς εγκοπή, προέκυψε η καμπύλη κόπωσης σ - N που παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 3**.



Διάγραμμα 3. Καμπύλη κόπωσης (σ - N) χάλυβα TRIP 700 χωρίς εγκοπή



Εικόνα 14. Επιφάνεια θραύσης από κόπωση Δοκιμίου 14 του χάλυβα TRIP 700. Παρατηρείται ξεκάθαρα η περιοχή έναρξης και διάδοσης της ρωγμής στο υλικό

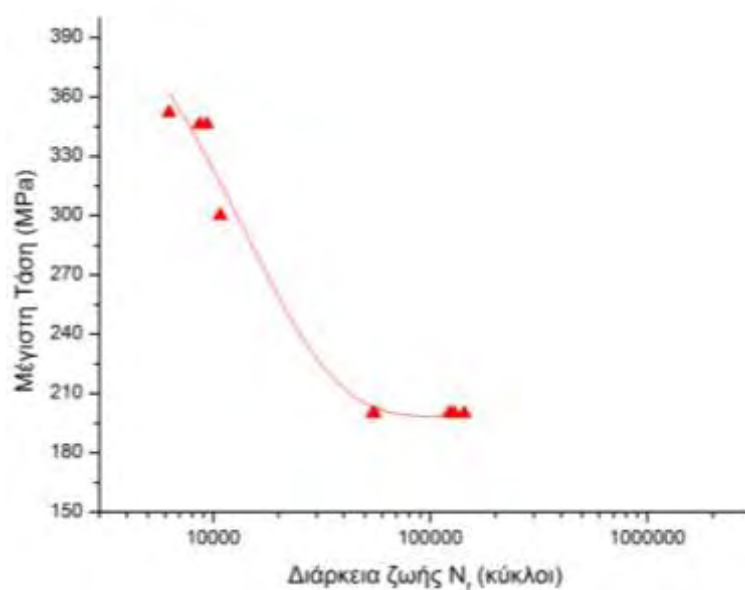
5.2.2 Δοκίμια με εγκοπή

Οι συνθήκες κόπωσης των 9 δοκιμών με εγκοπή του χάλυβα TRIP 700 και τα αποτελέσματα της συνολικής διάρκειας ζωής που προέκυψαν από τα πειράματα κόπωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6**.

Πίνακας 6. Συνθήκες κόπωσης χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή

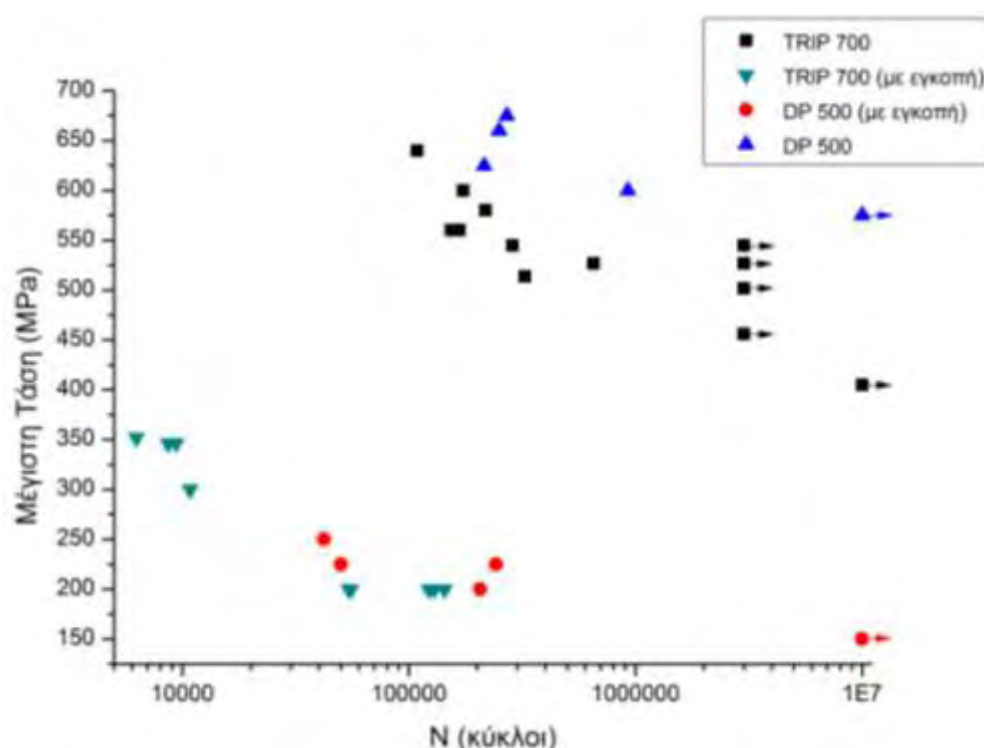
Δοκίμιο	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	σ_{mean} (MPa)	σ_a (MPa)	F_{\max} (KN)	F_{\min} (KN)	F_{mean} (KN)	F_a (KN)	Αριθμός κύκλων μέχρι την θραύση
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	352	35.2	158	194	8.045	0.804	4.425	3.62	6260
3	200	20	90	110	4.57	0.457	2.513	2.056	143377
4	346	34.6	156	190	7.91	0.791	4.35	3.559	8651
5	300	30	135	165	6.854	0.685	3.77	3.084	10800
6	200	20	90	110	4.57	0.457	2.513	2.056	122419
7	200	20	90	110	4.57	0.457	2.513	2.056	128721
8	200	20	90	110	4.57	0.457	2.513	2.056	54363
9	200	20	90	110	4.57	0.457	2.513	2.056	55327
10	346	34.6	156	190	7.91	0.791	4.35	3.559	9360

Από τα αποτελέσματα για την συνολική διάρκεια ζωής των δοκιμών του χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή, προέκυψε η καμπύλη κόπωσης σ -N που παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 4**.



Διάγραμμα 4. Καμπύλη κόπωσης (σ -N) χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή

Στο **Διάγραμμα 5** που ακολουθεί, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα κόπωσης για τα υλικά TRIP 700 και DP 500 για τα δοκίμια με και χωρίς εγκοπή.



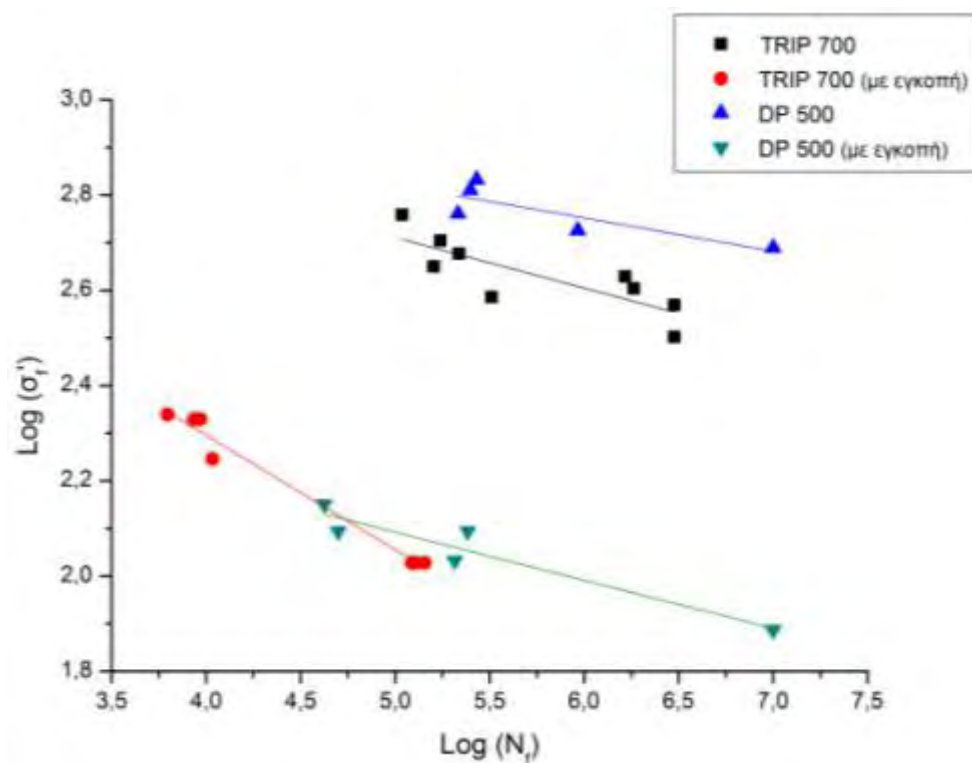
Διάγραμμα 5. Διάγραμμα κόπωσης (σ - N) με συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα υλικά TRIP 700 και DP 500

5.3 Προσδιορισμός σταθερών Basquin

Οι δοκιμές κόπωσης πραγματοποιήθηκαν επιλέγοντας την τιμή της μέγιστης εφαρμοζόμενης τάσης και τον λόγο τάσεων R με $\sigma_m \neq 0$ και το δοκίμιο καταπονούνταν μέχρι την αστοχία ή μέχρι να τερματιστεί η δοκιμή στον επιθυμητό αριθμό κύκλων (run out). Για να προσδιοριστούν όμως οι σταθερές Basquin, έπρεπε υπολογιστεί το ισοδύναμο πλάτος μέγιστης τάσης όπως προβλέπει ο Νόμος του Goodman και η Εξ. 1.3. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν, επεξεργασία των αποτελεσμάτων κόπωσης με σκοπό να υπολογιστεί η ισοδύναμη μέγιστη τάση (σ'_f) που προκαλεί την ίδια αστοχία (ίδιο N_f) αλλά για $\sigma_m = 0$. Στον **Πίνακα 7** παρουσιάζεται ο υπολογισμός των απαραίτητων τιμών για την προσαρμογή των αποτελεσμάτων κόπωσης σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η κλίση των ευθειών στο **Διάγραμμα 6** αποτιμείται ως η σταθερά b στην εμπειρική σχέση του Basquin, ενώ η σταθερά M υπολογίζεται απολογαριθμώντας την αποτέμνουσα του άξονα $\text{Log}(\sigma'_f)$ για κάθε μία ευθεία.

Πίνακας 7. Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων κόπωσης για την εξαγωγή των σταθερών *Basquin*

TRIP 700						
Μέγιστη Τάση(MPa)	N_f (κύκλοι)	σ_m	σ_a	σ_f	$\log(N_f)$	$\log(\sigma_f)$
600	173342	330	270	506	5.23890	2.704281
580	217796	319	261	475	5.33805	2.677077
527	1.83E+06	290	237	402	6.26162	2.604022
545	1643068	300	245	426	6.21566	2.629032
640	108809	352	288	573	5.03666	2.758401
502	3.00E+06	276	226	371	6.47712	2.568841
560	160000	308	252	446	5.20412	2.649705
514	324000	283	231	385	5.51055	2.585799
456	3.00E+06	251	205	318	6.47712	2.50234
TRIP 700 (με εγκοπή)						
Μέγιστη Τάση(MPa)	N_f (κύκλοι)	σ_m	σ_a	σ_f	$\log(N_f)$	$\log(\sigma_f)$
352.1	6260	194	158	218	3.79657	2.338819
346.2	8651	190	156	213	3.93707	2.328745
300	10800	165	135	176	4.03342	2.245698
200	55327	110	90	107	4.74294	2.027654
346.2	9360	190	156	213	3.97128	2.328745
200	128721	110	90	107	5.10965	2.027654
200	54363	110	90	107	4.73530	2.027654
200	122419	110	90	107	5.08785	2.027654
200	143377	110	90	107	5.15648	2.027654
DP 500						
Μέγιστη Τάση(MPa)	N_f (κύκλοι)	σ_m	σ_a	σ_f	$\log(N_f)$	$\log(\sigma_f)$
675	270000	371	304	680	5.43136	2.83248
660	250000	363	297	647	5.39794	2.810928
625	215000	344	281	577	5.33244	2.760935
600	925000	330	270	531	5.96614	2.725332
575	1.00E+07	316	259	489	7.00000	2.68968
DP 500 (με εγκοπή)						
Μέγιστη Τάση(MPa)	N_f (κύκλοι)	σ_m	σ_a	σ_f	$\log(N_f)$	$\log(\sigma_f)$
250	42200	138	113	141	4.62531	2.150741
225	50000	124	101	124	4.69897	2.093932
225	242000	124	101	124	5.38382	2.093932
200	206000	110	90	108	5.31387	2.032002
150	1.00E+07	83	68	77	7.00000	1.88628



Διάγραμμα 6. Ισοδύναμο πλάτος τάσης συναρτήσει κύκλων σε λογαριθμικούς άξονες

Αποτιμώντας το **Διάγραμμα 6** με την χρήση του λογισμικού Origin[®], υπολογίστηκαν οι σταθερές Basquin των υλικών με εγκοπή και χωρίς εγκοπή (βλ. **Παράρτημα Α1**). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**.

Πίνακας 8. Υπολογισμός σταθερών Basquin

Υλικό		Σταθερές	Τυπικό σφάλμα
TRIP 700	M	1738	
	b	-0.10603	±0.02791
TRIP 700 (με εγκοπή)	M	1766	
	b	-0.23804	±0.01553
DP 500	M	1479	
	b	-0.06982	±0.0268
DP 500 (με εγκοπή)	M	437	
	b	-0.10891	±0.01479

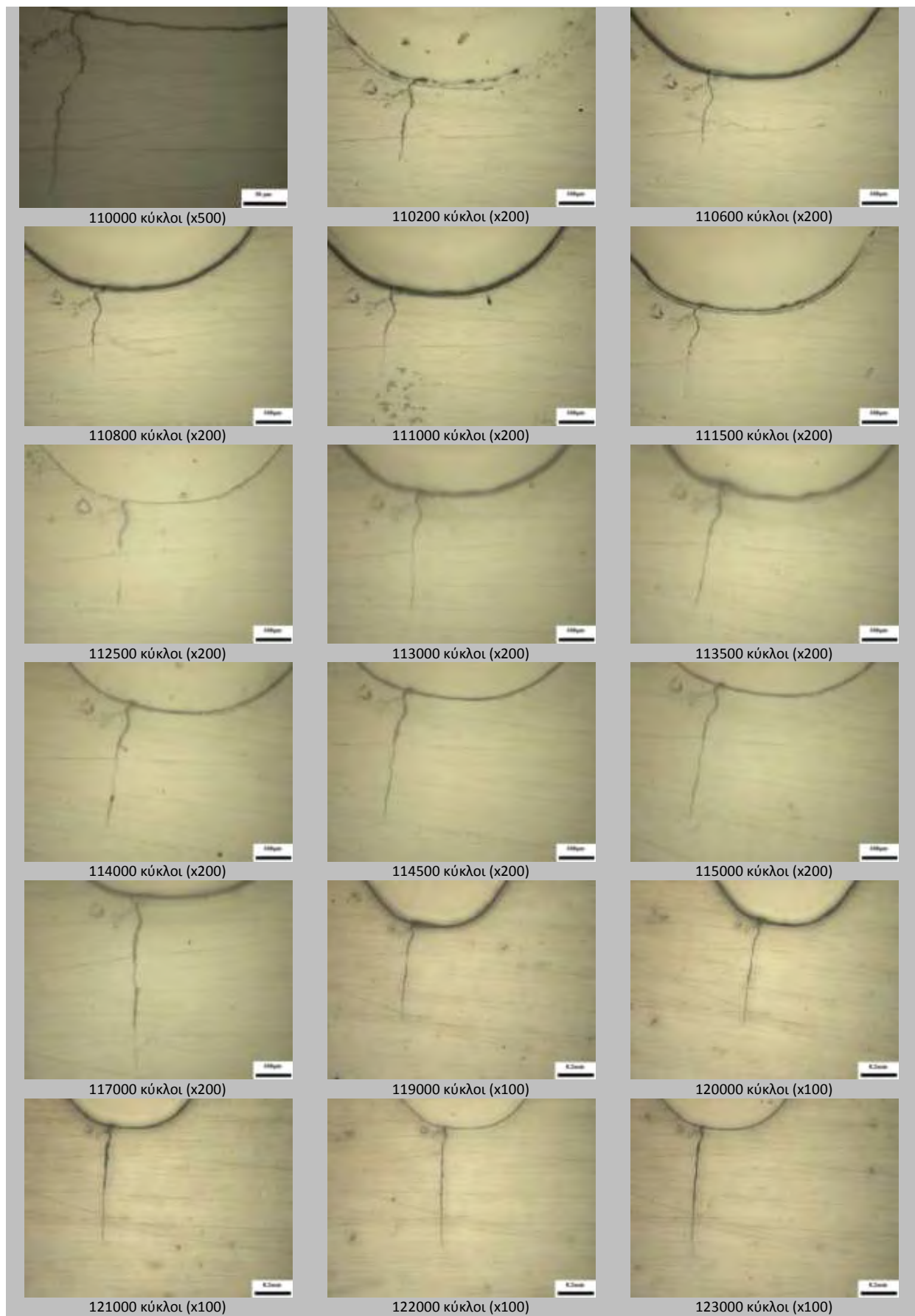
5.4 Μετρήσεις του μήκους ρωγμής

Κατά την κόπωση των δοκιμίων του χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή, μελετήθηκε παράλληλα και η αύξηση του μήκους ρωγμής, από την στιγμή (σε κύκλους) που εντοπίστηκε σε κάποιο αποτύπωμα ρέπλικας.

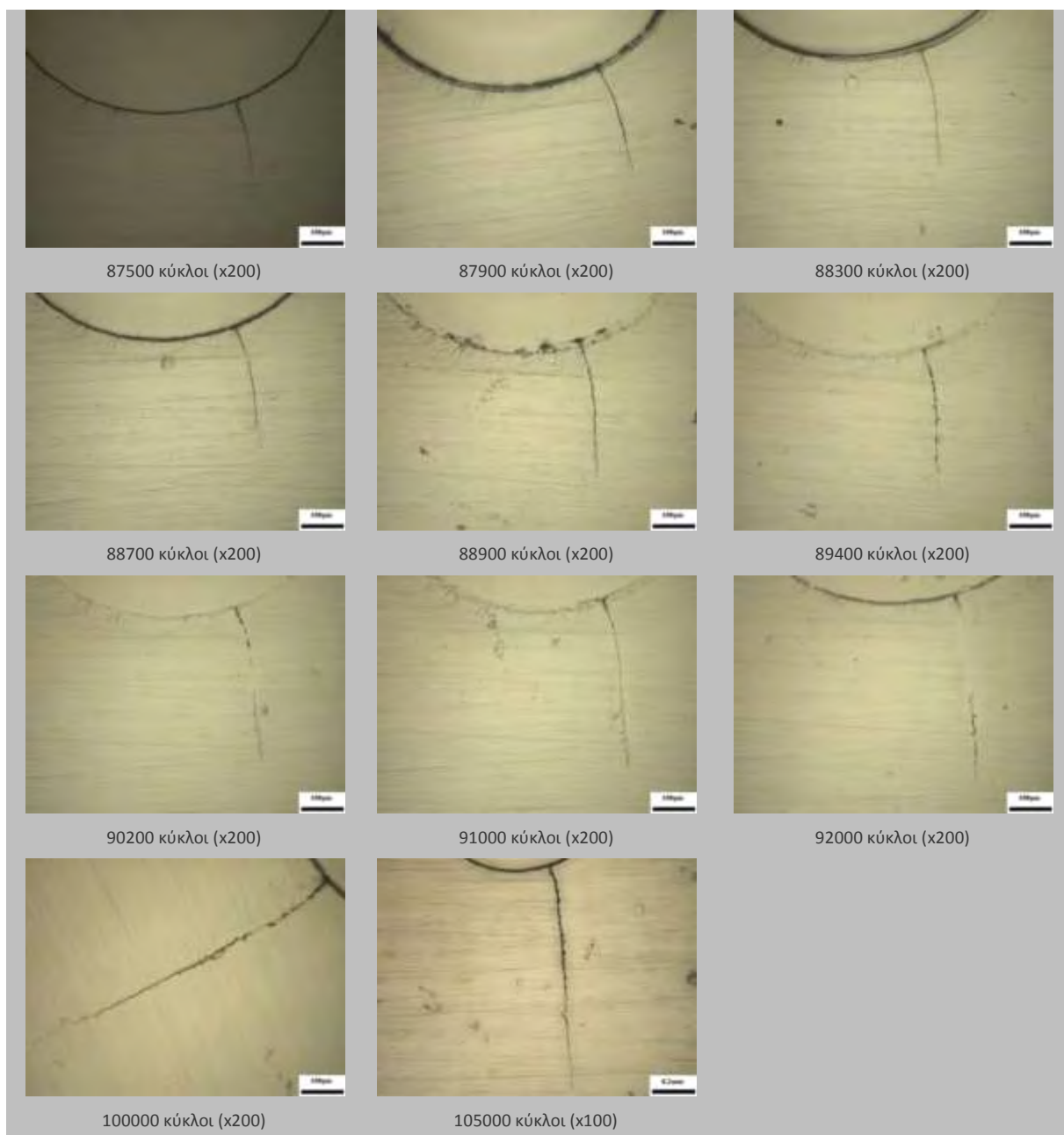
Στις **Εικόνες 15-17** που ακολουθούν παρουσιάζεται το κομμάτι της πειραματικής διαδικασίας για τα **Δοκίμια 3 και 6** του χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή, αναφορικά με την μελέτη της αύξησης του μήκους ρωγμής. Συγκεκριμένα, στην **Εικόνα 15** παρουσιάζονται οι ρέπλικες που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της αύξησης του μήκους ρωγμής για το **Δοκίμιο 3** του χάλυβα TRIP 700, ενώ στην **Εικόνα 17** παρουσιάζεται η εξέλιξη της ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης από την αιχμή της εγκοπής για μέγεθος τάσης 200MPa, για το **Δοκίμιο 6** του χάλυβα.



Εικόνα 15. Χαρακτηριστικά αποτυπώματα ρέπλικας για το δοκίμιο 3 του χάλυβα TRIP 700

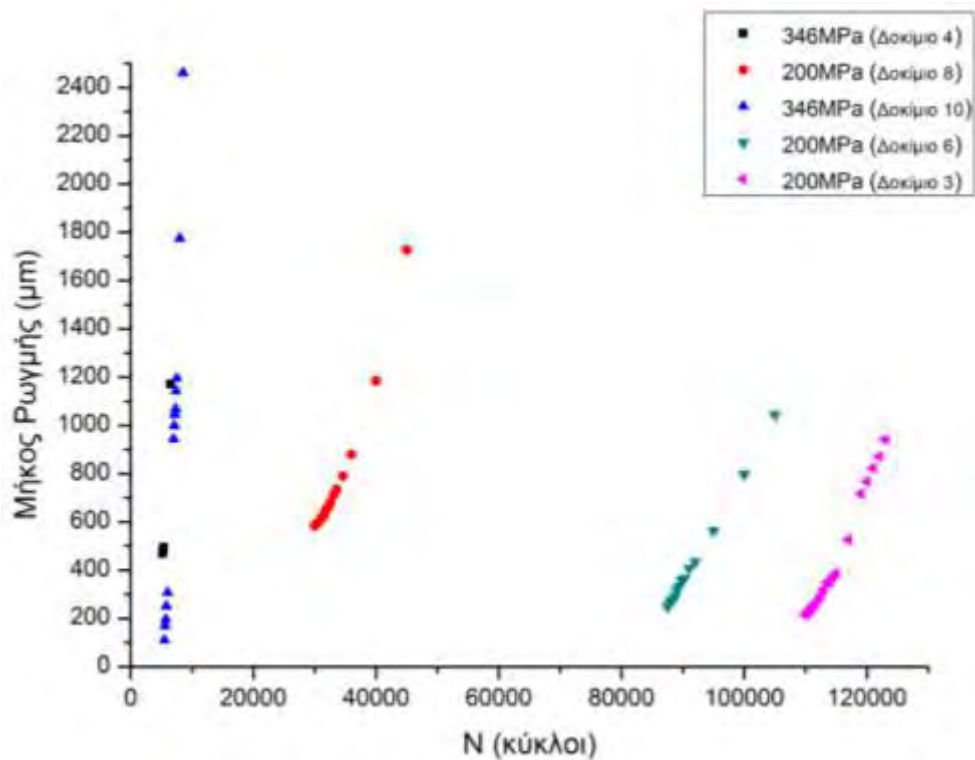


Εικόνα 16. Εξέλιξη ρήγματος σε χάλυβα TRIP 700 υπό κόπωση με μέγιστη τάση 200MPa (Δοκίμιο 3)



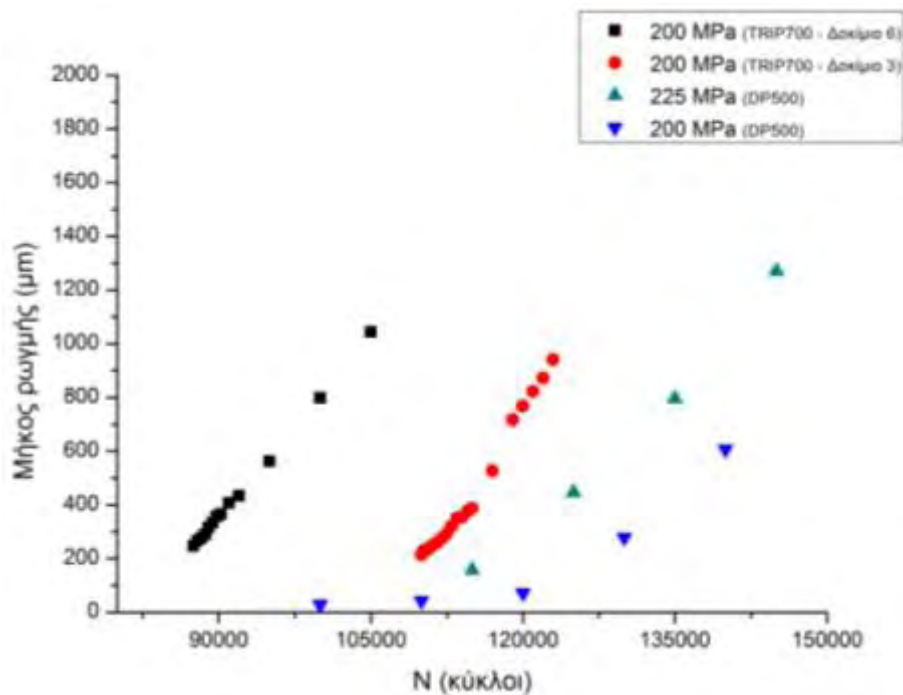
Εικόνα 17. Εξέλιξη ρήγματος σε χάλυβα TRIP 700 υπό κόπωση με μέγιστη τάση 200MPa (Δοκίμιο 6)

Στο **Διάγραμμα 7** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μετρήσεις της αύξησης του μήκους ρωγμής σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης για τα 5 δοκίμια που μελετήθηκαν. Όπως είναι αναμενόμενο, με τη μείωση της τάσης, προκύπτει αύξηση της διάρκειας ζωής που αντιστοιχεί σε εξέλιξη της ρωγμής. Οι μετρήσεις ξεκινούν από αρχικό ελάχιστο μήκος ρωγμής 200 μm , όπου είναι μήκος που αντιστοιχεί σε μακρορωγμή (στάδιο II).



Διάγραμμα 7. Μήκος ρωγμής συναρτήσει κύκλων χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή

Η σύγκριση του ρυθμού αύξησης του μήκους ρωγμής με τους κύκλους στον χάλυβα TRIP 500 και DP 500 παρατίθεται το **Διάγραμμα 8**.



Διάγραμμα 8. Μήκος ρωγμής συναρτήσει κύκλων για τους χάλυβες TRIP 700 και DP 500

Ως στάδιο έναρξης της εξέλιξης ρωγμής λήφθηκε ο αριθμός κύκλων που αντιστοιχεί σε μήκος 280 μm . Κατά αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε το ποσοστό της διάρκειας ζωής σε κόπωση των δοκιμών που αντιστοιχεί στην φάση έναρξης της ρωγμής. Το ποσοστό αυτό παρουσιάζεται στον **Πίνακα 9**.

Πίνακας 9. Ποσοστά διάρκειας ζωής σε κόπωση των δοκιμών κατά την φάση έναρξης της ρωγμής

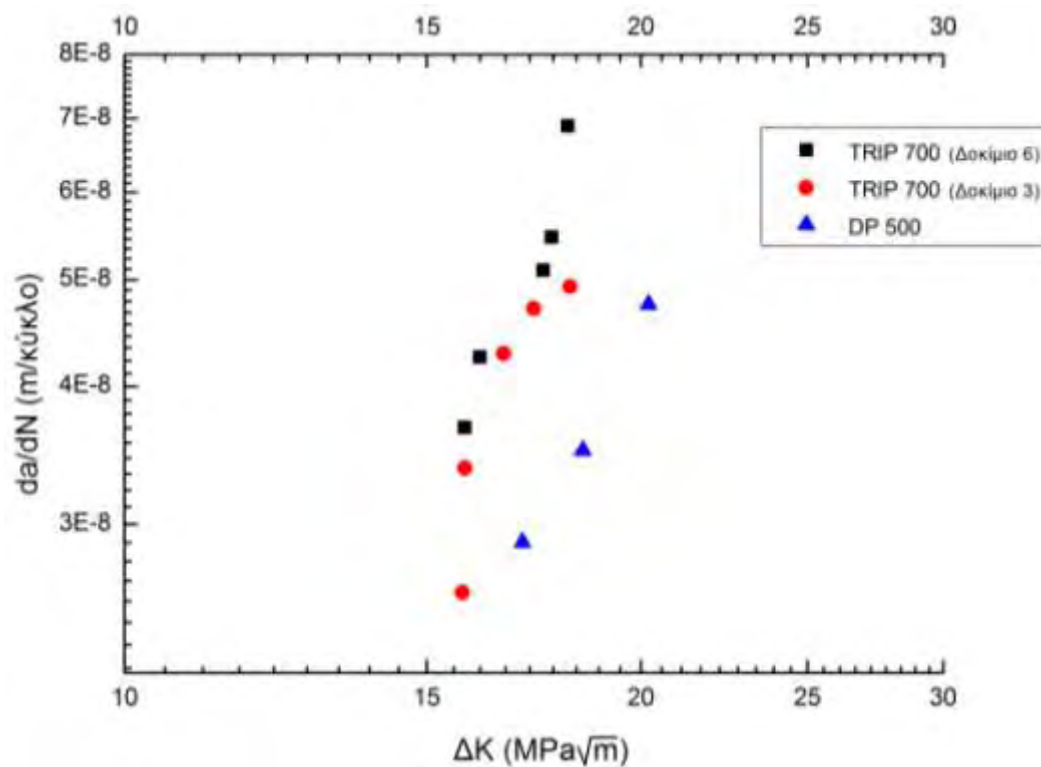
Υλικό	Μέγιστη Τάση (MPa)	Ποσοστό συνολικής διάρκειας ζωής που αντιστοιχεί σε εντοπισμό ρωγμής 280 μm (%Nf)
TRIP 700 (με εγκοπή)	200	72.1
	200	78.1
DP 500 (με εγκοπή)	200	63.1
	225	49.2

5.5 Προσδιορισμός σταθερών Paris

Στη συνέχεια της μελέτης, για την εξαγωγή των διαγραμμάτων $da/dN - \Delta K$ και κατ' επέκταση για τον προσδιορισμό των σταθερών Paris, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα 2 δοκίμια του χάλυβα TRIP 700 (Δοκίμια 3 και 6) που αντιστοιχούν σε μέγιστη τάση 200 MPa και είχαν συνολική διάρκεια ζωής $>10^5$ κύκλους, καθώς εμφανίζουν μικρότερη πλαστικότητα στην αιχμή της εγκοπής.

Από τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν για την διάδοση της ρωγμής, και σύμφωνα με τις Εξ. 1.10, 1.11 και 1.13, υπολογίστηκε το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων (ΔK) συναρτήσει του ρυθμού εξέλιξης της ρωγμής (da/dN) και παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 9**.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία δοκιμών (V-shaped notched κατά ASTM E 466) δεν είναι κατάλληλη σύμφωνα με τις προδιαγραφές για την εξαγωγή διαγραμμάτων $da/dN - \Delta K$, καθώς δεν τηρούνται οι περιορισμοί που επιτάσσουν οι αρχές της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας. Παρόλα αυτά, στην παρούσα μελέτη, προσδιορίστηκαν «εικονικοί» ρυθμοί εξέλιξης της ρωγμής ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την συμπεριφορά ανοχής σε βλάβη των δύο υλικών.



Διάγραμμα 9. «Εικονικός» ρυθμός διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔK για το εύρος 15-20 MPa \sqrt{m}

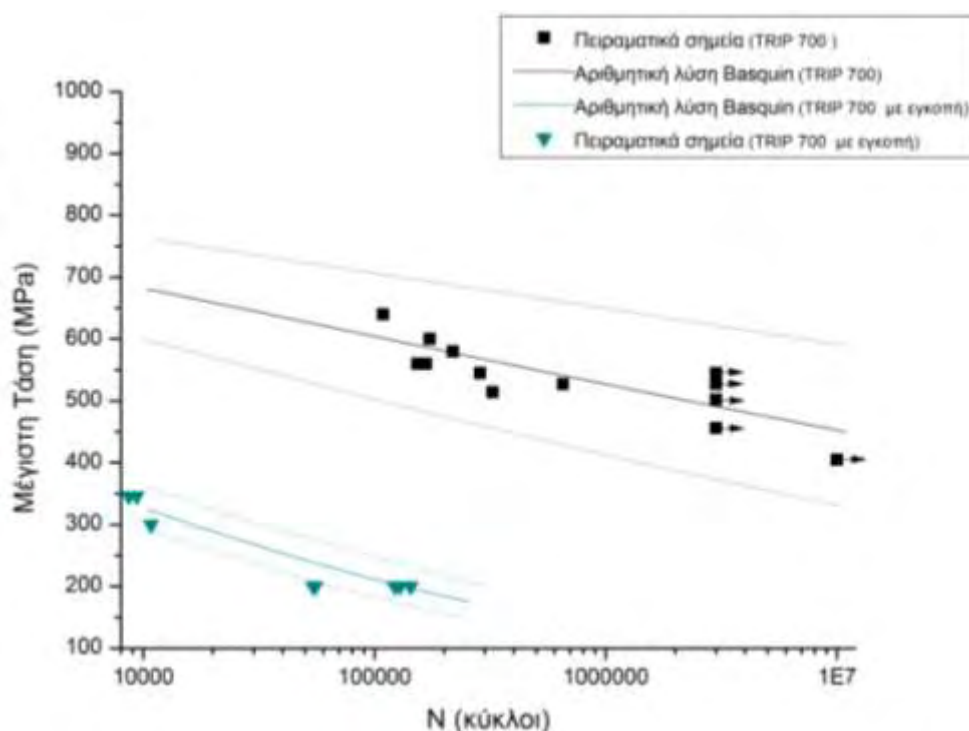
Αποτιμώντας το **Διάγραμμα 9** με την χρήση του λογισμικού Origin[®], υπολογίστηκαν οι σταθερές Paris των δύο δοκιμών του χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή καθώς και του χάλυβα DP 500 με εγκοπή, για τιμή μέγιστης τάσης 200MPa (βλ. **Παράρτημα Α1**). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10**.

Πίνακας 10. Υπολογισμός σταθερών Paris

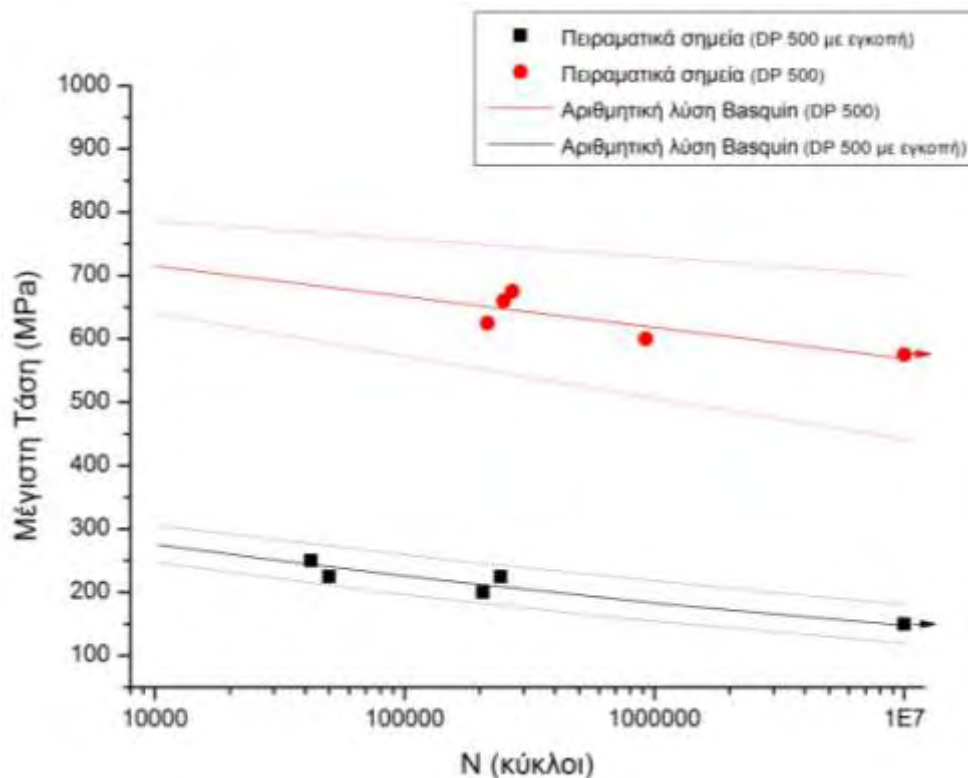
Υλικό		Σταθερές	Τυπικό σφάλμα
TRIP 700 (Δοκίμιο 6)	C	1.058E-11	
	m	2.96879	±0.468
TRIP 700 (Δοκίμιο 3)	C	2.24E-11	
	m	2.66988	±0.631
DP 500	C	6.80E-12	
	m	2.94	±0.315

5.6 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής και κύκλων για την έναρξη ρωγμής μέσω αριθμητικής λύσης των νόμων Basquin και Paris

Χρησιμοποιώντας τους εξαγόμενους συντελεστές Basquin από το πρώτο μέρος των αποτελεσμάτων, για τους χάλυβες TRIP 700 και DP 500, προβλέφθηκε η διάρκεια ζωής (N_f) σε κόπωση συναρτήσει την τιμή της μέγιστης τάσης. Κατ' ουσίαν, η αριθμητική λύση του νόμου Basquin για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής, αποτελεί μια γραμμική προσαρμογή (fitting) των πειραματικών δεδομένων στο διάγραμμα σ - N . Στα **Διαγράμματα 10** και **11** παρουσιάζεται η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής από την αριθμητική λύση του νόμου Basquin για τα δύο υλικά.



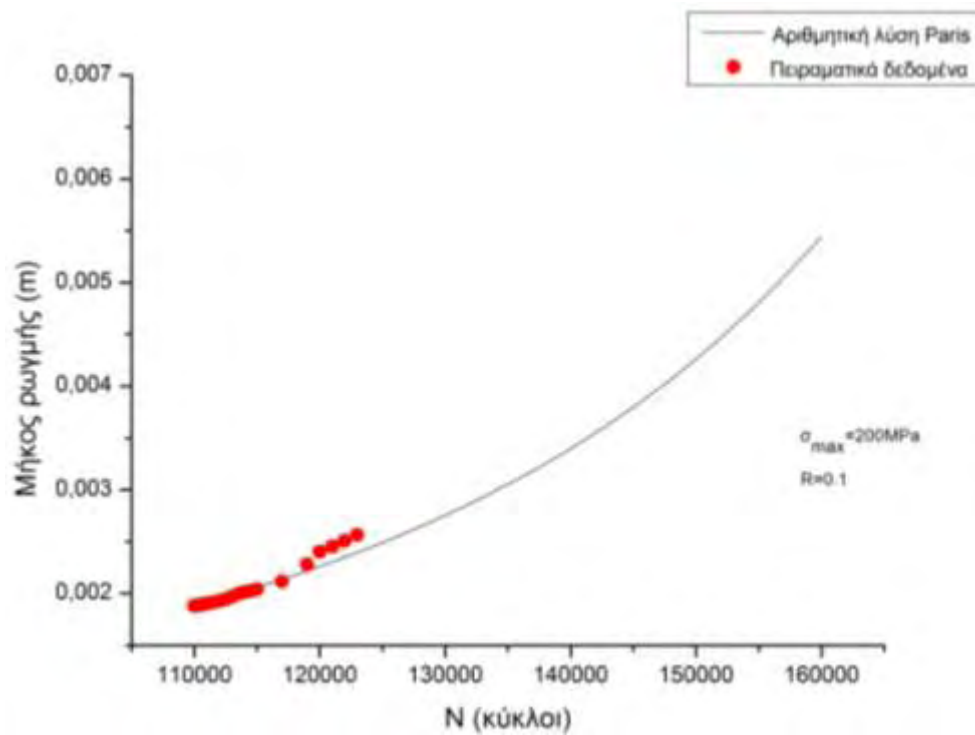
Διάγραμμα 10. Καμπύλες σ - N που προέκυψαν από την αριθμητική λύση του νόμου Basquin για την συνολική διάρκεια ζωής (N_f) του χάλυβα TRIP 700



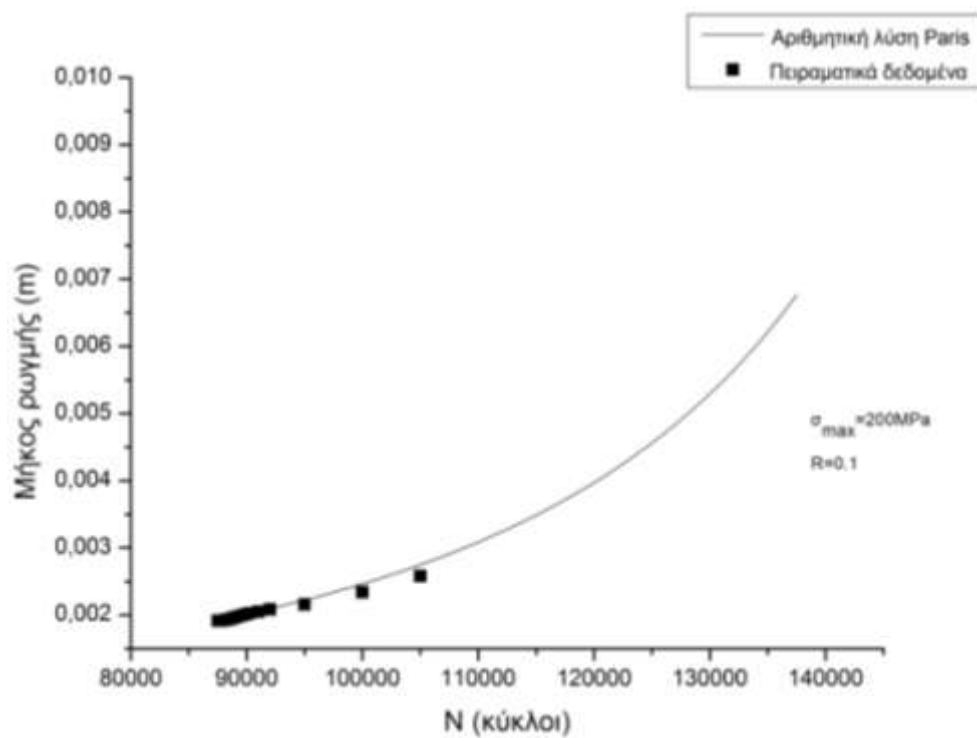
Διάγραμμα 11. Καμπύλες σ - N που προέκυψαν από την αριθμητική λύση του νόμου Basquin για την συνολική διάρκεια ζωής (N_f) του χάλυβα DP 500

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα, οι διακεκομμένες γραμμές, οριοθετούν την περιοχή έγκυρης πρόβλεψης της διάρκειας ζωής σύμφωνα με το νόμο του Basquin, λαμβάνοντας υπ όψιν το τυπικό σφάλμα εκτίμησης των σταθερών b και M για κάθε υλικό.

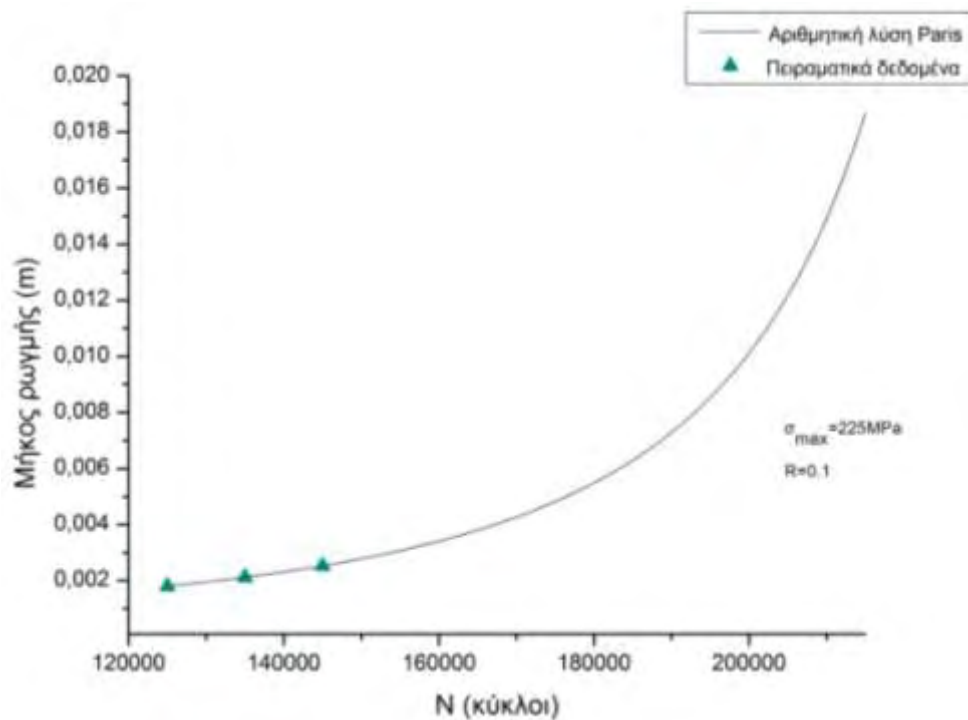
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αριθμητική ολοκλήρωση του νόμου του Paris σύμφωνα με κατάλληλα τροποποιημένο κώδικα στο λογισμικό MatLab (βλ. **Παράρτημα A2**), για τα Δοκίμια 3 και 6 του χάλυβα TRIP 700 και τον χάλυβα DP 500. Σκοπός της αριθμητικής ολοκλήρωσης ήταν να εκτιμηθούν οι «εικονικοί» ρυθμοί της εξέλιξης του μήκους ρωγμής, δεδομένων των πειραματικών σημείων και των σταθερών C και m που υπολογίστηκαν στο πρώτο μέρος. Ως σημείο έναρξης του αλγορίθμου θεωρήθηκε το πρώτο εντοπίσιμο μήκος ρωγμής με την μέθοδο της ρέπλικας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα **Διαγράμματα 12-14**.



Διάγραμμα 12. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής για το Δοκίμιο 3 του χάλυβα TRIP 700

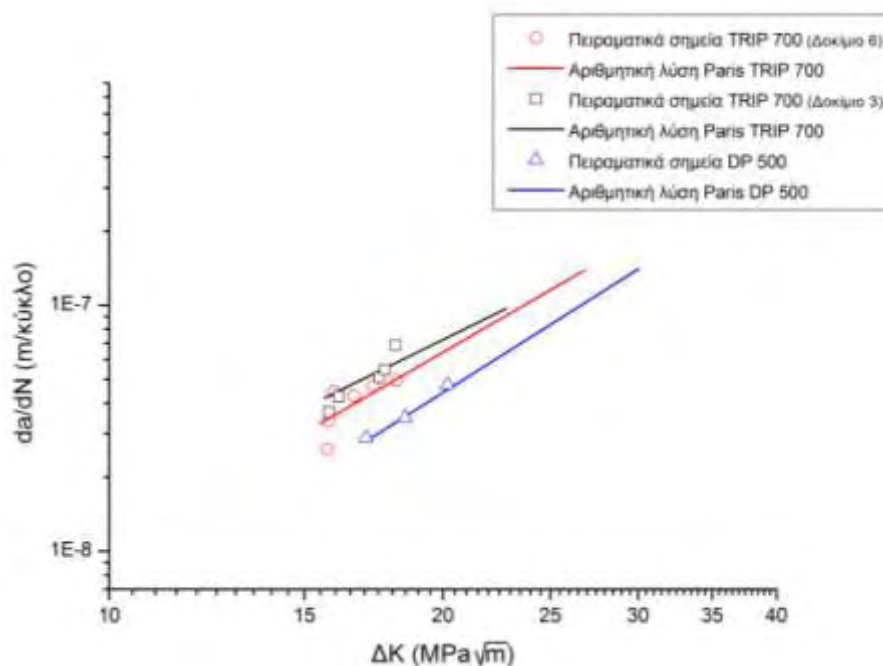


Διάγραμμα 13. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής για το Δοκίμιο 6 του χάλυβα TRIP 700



Διάγραμμα 14. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής για τον χάλυβα DP 500

Η πληροφορία που εξάγεται από την πρόβλεψη της εξέλιξης του μήκους ρωγμής στους χάλυβες υψηλής αντοχής που μελετώνται, δεδομένων των σταθερών Paris, χρησιμοποιείται για να προβλεφθεί ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής συναρτήσει του εύρους του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων (**Διάγραμμα 15**).



Διάγραμμα 15. Πρόβλεψη «εικονικού» ρυθμού διάδοσης ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔK

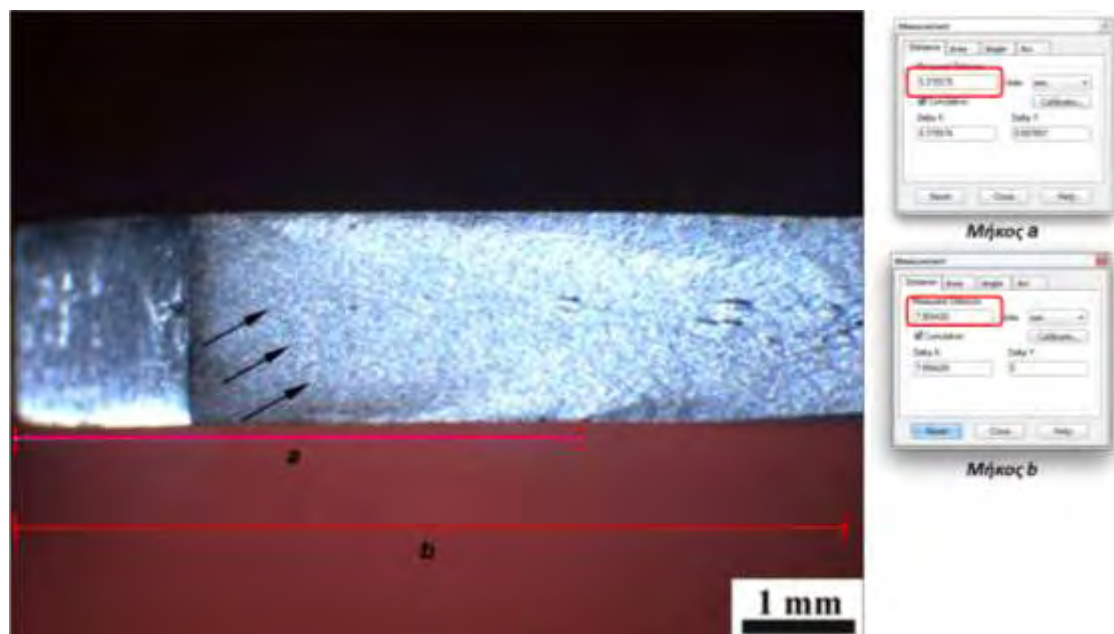
5.7 Μεθοδολογία εκτίμησης της διάρκειας ζωής για την εκκίνηση της ρωγμής

Δεδομένης της παραδοχής ότι η συνολική διάρκεια ζωής ενός υλικού που καταπονείται από εναλλασσόμενα κυκλικά φορτία, ισοδυναμεί, με τον αριθμό κύκλων που απαιτούνται για την εμφάνιση της ρωγμής και τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για την διάδοσή της μέχρι την θραύση ($N_f = N_{\text{εκκ}} + N_{\text{διαδ}}$), πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη που ως σκοπό είχε την πρόβλεψη του αριθμού κύκλων που απαιτούνται για την εκκίνηση ρωγμής στο Δοκίμιο 6 του χάλυβα TRIP 700.

Πίνακας 11. Παραμετρική μελέτη πρόβλεψης της εκκίνησης ρωγμής

TRIP 700			
Μέγιστη ανοχή σε εφελκυσμό	σ_{UTS}	707 MPa	
Συνθήκες φόρτισης	σ_{max}	200 Mpa	
	R	0.1	
	σ_{min}	20 Mpa	
	σ_r	107 Mpa	
Πρόβλεψη νόμου Basquin	b	-0.23804	N_f : 132514 κύκλοι
	M	1766	
Πρόβλεψη νόμου Paris	m	2.96	$N_{\text{διαδ}}$: 49419 κύκλοι
	C	1.068E-11	
Γεωμετρικός συντελεστής	F	1.119	
Μήκη ρωγμών	α_0	0.001917 m	
	α_{cr}	0.0066 m	
$N_{\text{εκκ}}$: 83095 κύκλοι			

Μελετώντας την επιφάνεια θραύσης του *Δοκιμίου 6* του χάλυβα TRIP 700 στο στερεοσκόπιο (**Εικόνα 18**), διακρίνεται η διεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό του δοκιμίου, ενώ παράλληλα φαίνεται ότι μέχρι το μήκος a η ρωγμή δεν ήταν ακόμη διαμπερής και μετά το μήκος b η ταχύτατη διάδοσή της προκάλεσε όλκιμη θραύση στο υλικό.



Εικόνα 18. Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 6 χάλυβα TRIP 700 (x16). Παρατηρείται η περιοχή έναρξης και διάδοσης της ρωγμής και υπολογίζονται τα μήκη a και b

Η μεθοδολογία πρόβλεψης του $N_{ΕΚΚ}$, συνδυάζοντας τα στοιχεία του **Πίνακα 11** με την πληροφορία που εξάγεται από την **Εικόνα 18** για τα μήκη a και b , παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφ. 6.5.

6. Συζήτηση αποτελεσμάτων

6.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Όπως προκύπτει από τη συγκριτική αξιολόγηση (**Διαγράμματα 1 και 2**), ο χάλυβας TRIP 700 εμφανίζει αντίστοιχο όριο διαρροής και λίγο μεγαλύτερο όριο αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με τον DP 500, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη ολκιμότητα, με την παραμόρφωση θραύσης να φθάνει στο 23.2% έναντι περίπου 4% του DP 500, που οφείλεται σε μηχανική κατεργασία για απόκτηση μέγιστης σκληρότητας. Επιβεβαιώνεται λοιπόν, ότι ο χάλυβας TRIP 700 εμφανίζει εξαιρετικό συνδυασμό αντοχής και διαμορφωσιμότητας.

Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι η ικανότητα εργοσκήρυνσης του χάλυβα TRIP 700, εξαντλείται σχεδόν σε όλο το φάσμα παραμόρφωσής του με μικρό ρυθμό, ενώ στον DP 500 ο ρυθμός εργοσκήρυνσης είναι μεγάλος μετά το όριο διαρροής και το δυναμικό εργοσκήρυνσης συγκεντρώνεται όλο μέχρι ποσοστά παραμόρφωσης της τάξης του 1%. Η χαρακτηριστική αυτή διαφορά στη συμπεριφορά των δύο υλικών έχει ενδιαφέρον και συζητείται και στη συνέχεια στα αποτελέσματα κόπωσης.

6.2 Δοκιμές κόπωσης

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων κόπωσης που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία για τα δοκίμια με εγκοπή και χωρίς εγκοπή, ιδιαίτερης αναφοράς χρίζουν τα παρακάτω:

6.2.1 Δοκίμια χωρίς εγκοπή

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 5**, για τα δοκίμια χωρίς εγκοπή, φαίνεται ότι η συμπεριφορά του χάλυβα DP 500 σε κόπωση είναι υπέρτερη του χάλυβα TRIP 700. Συγκεκριμένα, τα τεχνητά όρια κόπωσης που προέκυψαν για τους δύο χάλυβες, είναι 502MPa για τον χάλυβα TRIP 700 στους $3 \cdot 10^6$ κύκλους και 575MPa για τον χάλυβα DP 500 στους 10^7 κύκλους. Αν και ο αριθμός των πειραματικών σημείων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του χάλυβα DP 500 στο διάγραμμα σ-N δεν είναι επαρκής, φαίνεται πως ολόκληρη η συμπεριφορά του χάλυβα TRIP 700 περιγράφεται σε μεγαλύτερο εύρος μέγιστων τάσεων (502-640MPa) σε αντίθεση με εκείνη του χάλυβα DP 500 (575-

675MPa), γεγονός το οποίο υποδηλώνει την μεγάλη ευαισθησία του χάλυβα DP 500 στις μεταβολές των τάσεων με αντίκτυπο στην συνολική διάρκεια ζωής.

6.2.2 Δοκίμια με εγκοπή

Αναφορικά με τα δοκίμια κόπωσης με εγκοπή, φαίνεται ότι η ύπαρξή της υποβαθμίζει αισθητά την διάρκεια ζωής και για τα δύο υλικά. Ο μικρός αριθμός των δοκιμών του χάλυβα TRIP 700 εισήγαγε μια μικρή αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του ορίου κόπωσης, γεγονός το οποίο εισάγει και αβεβαιότητα στον υπολογισμό των σταθερών Basquin.

Με την βοήθεια του **Διαγράμματος 5** υπολογίστηκε ο συντελεστής εγκοπής σε κόπωση. Για τον χάλυβα TRIP 700 προέκυψε τιμή $K_f=560/200=2.8$, ενώ για τον DP 500 $K_f=600/180=3.33$. Συνεπώς, και για τα δύο υλικά, προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή εγκοπής σε κόπωση K_f είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή του ελαστικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t . Στον **Πίνακα 12** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τον προσδιορισμό του συντελεστή ευαισθησίας της εγκοπής (q) για τα δύο υλικά.

Πίνακας 12. Υπολογισμός συντελεστή ευαισθησίας εγκοπής

Υλικό	K_t	K_f	q
TRIP 700	≈ 2.18	2.8	1.18
DP 500	2	3.33	2.33

Η τιμή του q και για τα δύο υλικά καθώς είναι μεγαλύτερη του 1, δείχνει ότι η επίδραση της εγκοπής είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από ότι θα αναμενόταν.

Δεδομένου ότι γενικά για όλκιμα μέταλλα η τιμή K_f βρίσκεται χαμηλότερα από την τιμή K_t , τα αποτελέσματα που παρουσιάζει ο **Πίνακας 12** είναι κατ' αρχήν αξιοπερίεργα. Για τον χάλυβα DP 500 η εξήγηση οφείλεται στην κατεργασία και την ψαθυρή συμπεριφορά σε συνδυασμό με την μεγάλη αντοχή που δικαιολογεί ο συντελεστής K_f να εμφανίζεται μεγαλύτερος σε σχέση με τον K_t . Για τον χάλυβα TRIP 700 η διαφορά K_f και K_t είναι μικρότερη λόγω όλκιμης συμπεριφοράς αλλά υπαρκτή. Εδώ η πιθανότητα να λαμβάνει χώρα μαρτενσιτικός μετασχηματισμός στην αιχμή της εγκοπής, λόγω σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων, ενδέχεται να είναι σημαντική.

Αξιοσημείωτη είναι όμως η συμπεριφορά του χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή, κατά την κόπωση σε υψηλές τάσεις. Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 6**, τα **Δοκίμια 4** και **10** καταπονήθηκαν σε κόπωση με μέγιστη τάση τα 346 MPa. Σε συνδυασμό με τα στοιχεία του

Πίνακα 3, η τοπική τάση στην εγκοπή ήταν 772 MPa, πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από την τιμή του ορίου διαρροής του υλικού. Παρ' ότι λοιπόν, η τάση που εφαρμόστηκε, σε συνδυασμό με τον ελαστικό συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων K_t , επέφερε φαινόμενα έντονης πλαστικής διαρροής στην αιχμή της εγκοπής, τα δοκίμια άντεξαν περίπου 10^5 κύκλους.

6.3 Έναρξη και διάδοση ρωγμής

Ενδιαφέροντα στοιχεία προκύπτουν από την συμπεριφορά των υλικών σε σχέση με την εξέλιξη της ρωγμής. Άξια αναφοράς είναι τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9**. Το γεγονός ότι η ρωγμή (με βάση κάποιο αρχικό μήκος αναφοράς) αρχίζει να εμφανίζεται στο 56-57% της συνολικής διάρκειας ζωής για τον χάλυβα DP 500 με εγκοπή, σε αντίθεση με το 75% για τον χάλυβα TRIP 700. Παρόλο που η συνολική συμπεριφορά κόπωσης του χάλυβα DP 500 είναι καλύτερη, φαίνεται ότι ο χάλυβας TRIP 700 παρουσιάζει μεγαλύτερη καθυστέρηση στην έναρξη της ρωγμής από την εγκοπή. Και σε αυτή την περίπτωση θεωρείται αρκετά πιθανό να λαμβάνει χώρα μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, ο οποίος καθυστερεί την έναρξη της ρωγμής από την εγκοπή, καθώς το υλικό σκληραίνει κατά την κόπωση. Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται για να εξεταστεί ο παραπάνω μετασχηματισμός κατά την κόπωση ενός χάλυβα TRIP με εγκοπή.

Στο **Διάγραμμα 8** παρουσιάζεται η αύξηση του μήκους ρωγμής συναρτήσει των κύκλων για 2 δοκίμια του χάλυβα TRIP 700 και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προγενέστερης μελέτης για τον χάλυβα DP 500. Είναι ξεκάθαρο πως για την τιμή των τάσεων που εξετάζεται η εξέλιξη των ρωγμών, επιβεβαιώνεται ότι ο χάλυβας DP 500 παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή στην βλάβη. Η ολκιμότητα του DP 500 λόγω του μαλακού φερρίτη που περιέχει, έχει ως αποτέλεσμα την σταθεροποίηση της πλαστικής ροής και μεγάλες ομοιόμορφες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα η ρωγμή να διατηρείται στο υλικό για περισσότερους κύκλους μέχρι την θραύση.

Παράλληλα, στο **Διάγραμμα 9** από τα λίγα μεν στοιχεία για τον «εικονικό» ρυθμό διάδοσης της ρωγμής στον χάλυβα DP 500 συναρτήσει του συντελεστή έντασης τάσεων ΔK , οι ρυθμοί διάδοσης ρωγμής που προκύπτουν είναι χαμηλότεροι από τον χάλυβα TRIP 700, για το εύρος ΔK : 15-20 MPa $m^{1/2}$.

Η υπεροχή του χάλυβα DP 500 όσον αφορά στο μέρος της διάδοσης της ρωγμής χρειάζεται παραπάνω διερεύνηση. Ο χάλυβας DP 500 όπως παρατηρήθηκε και από τις

δοκιμές εφελκυσμού [23], εμφανίζει μεγαλύτερους ρυθμούς εργοσκήρυσης σε μικρότερες παραμορφώσεις (κατάσταση που επικρατεί στην αιχμή της εγκοπής). Η επίδραση του παραπάνω μηχανισμού, σχετικά με τον μηχανισμό εξέλιξης της ρωγμής χρειάζεται επίσης διερεύνηση.

6.4 Εγκυρότητα πρόβλεψης νόμων Basquin και Paris

Το κρίσιμο και απαιτητικό εγχείρημα του προσδιορισμού των σταθερών Basquin και Paris για κάθε υλικό απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Ο λόγος είναι όχι μόνο να περιοριστεί η έκταση του τυπικού σφάλματος εκτίμησης των σταθερών, αλλά να ελεγχθεί και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, ώστε να πραγματοποιηθεί αρκετά καλή προσαρμογή των δεδομένων στα διαγράμματα $\sigma-N$ και $da/dN - \Delta K$. Όπως φαίνεται στα **Διαγράμματα 10** και **11**, η περιοχή της έγκυρης πρόβλεψης του νόμου Basquin, δεδομένων των πειραματικών αποτελεσμάτων για τον χάλυβα TRIP 700 και DP 500, εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα τάσεων - κύκλων, γεγονός το οποίο σίγουρα προσθέτει ένα συστηματικό σφάλμα στην πρόβλεψη της διάρκειας ζωής. Αν αναλογιστεί κανείς ότι ήδη οι εμπειρικές αυτές σχέσεις πρόβλεψης ενέχουν εξαρχής ένα σφάλμα εκτίμησης, τότε γίνεται επιτακτική η ανάγκη εξέτασης πολυάριθμων πειραμάτων.

6.5 Πρόβλεψη έναρξης και διάδοσης ρωγμής

Η αριθμητική ολοκλήρωση της Εξ. 1.19 στο περιβάλλον του MatLab είχε ως σκοπό, να προβλεφθεί η συμπεριφορά αύξησης του μήκους ρωγμής σε συνάρτηση με τους κύκλους καταπόνησης για τιμές μήκους ρωγμής που δεν μετρήθηκαν με τη μέθοδο της ρέπλικας. Τα **Διαγράμματα 12-14** αποτελούν μια μη γραμμική παρεμβολή των πειραματικών σημείων με σκοπό να προβλεφθεί ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής συναρτήσει του συντελεστή ΔK . Οι σταθερές του νόμου Paris που προσδιορίστηκαν είναι κοντά σε τιμές με πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία για τους χάλυβες υψηλής αντοχής [18].

Αναφορικά με τους κύκλους που απαιτούνται για την έναρξη της ρωγμής στον χάλυβα TRIP 700 με εγκοπή, συνδυάζοντας τις αριθμητικές λύσεις πρόβλεψης των νόμων Basquin και Paris, τις μετρήσεις των μηκών a και b στην επιφάνεια θραύσης του *Δοκιμίου 6* (**Εικόνα 18**) και με αρχικό μήκος ρωγμής $a_0=0.001917$ m (εντοπίσιμη ρωγμή στους 87500 κύκλους στην **Εικόνα 17**), προβλέφθηκε ότι το $N_{εγκ}$ είναι 83095 κύκλοι.

Πιο αναλυτικά, στον **Πίνακα 11** προβλέπεται αρχικά η διάρκεια ζωής N_f σύμφωνα με τον νόμο Basquin, για μέγιστη τάση 200 MPa και $R=0.1$, χρησιμοποιώντας τις σταθερές Basquin που υπολογίστηκαν από τα πειράματα κόπωσης με εγκοπή, για το Δοκίμιο 6. Έπειτα, μελετώντας την επιφάνεια θραύσης που παρουσιάζει η **Εικόνα 18**, φαίνεται ότι μέχρι το μήκος a (0.0053m) η ρωγμή δεν έχει γίνει ακόμη διαμπερής στο υλικό, ενώ από το μήκος b και μετά (>0.0079 m) φαίνεται να ξεκινά η όλκιμη θραύση στο υλικό. Επιλέγεται λοιπόν ένα μήκος ρωγμής μέσα στις δύο περιοχές ως κρίσιμο μήκος ρωγμής ($a < a_{cr} = 0.0066\text{m} < b$) και εισάγεται στην αριθμητική πρόβλεψη του νόμου Paris. Έτσι, δεδομένων των σταθερών Paris που υπολογίστηκαν πειραματικά, της τιμής του γεωμετρικού συντελεστή F , του αρχικού μήκους ρωγμής a_0 και της τιμής a_{cr} , προβλέπεται ο αριθμός των κύκλων που απαιτούνται για την διάδοση της ρωγμής. Χρησιμοποιώντας την σχέση $N_{εKK} = N_f - N_{διαδ}$, προβλέπονται οι κύκλοι που απαιτούνται για την έναρξη της ρωγμής. Από την πειραματική διαδικασία είναι γνωστό ότι η εκκίνηση αυτής της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στους **87500** κύκλους, ενώ η πρόβλεψη για το $N_{εKK}$ έδειξε ότι απαιτούνται **83095** κύκλοι.

7. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα.

Για τα δοκίμια κόπωσης χωρίς εγκοπή, ο χάλυβας DP 500 Cold Rolled Full Hard φαίνεται να υπερτερεί του χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled, σε όλο το φάσμα πολυκυκλικής κόπωσης και με υψηλότερη τιμή ορίου κόπωσης. Ο χάλυβας TRIP 700 φαίνεται να έχει μικρότερη ευαισθησία στις μεταβολές της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης κατά την κόπωση. Επιπλέον, για τον χάλυβα DP 500 κατά την κόπωση σε τάσεις κοντά και πάνω από το όριο διαρροής, φαίνεται ότι η διάρκεια ζωής των δοκιμών αυξάνεται σε σχέση με δοκίμια που καταπονούνται από τάσεις κοντά και κάτω από την τιμή $\sigma_{y0.2}$. Το γεγονός αυτό πιθανώς οφείλεται στην μεγαλύτερη τάση για εργοσκήρυνση από τον TRIP 700 κοντά στο όριο διαρροής, αλλά απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός πειραμάτων και διερεύνησης για εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Στη συμπεριφορά κόπωσης δοκιμών με εγκοπή, η παρουσία εγκοπής υποβαθμίζει αισθητά την διάρκεια ζωής και των δύο υλικών. Στην περίπτωση αυτή ο χάλυβας TRIP 700 έρχεται πολύ κοντά στη συμπεριφορά του DP 500 που σημαίνει ότι η παρουσία εγκοπής υποβαθμίζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη συμπεριφορά κόπωσής του, σε σχέση με αυτή του TRIP.

Ακόμη, η πειραματική μελέτη της έναρξης της ρωγμής σε δοκίμια με εγκοπή έδειξε ότι η ρωγμή στον χάλυβα TRIP 700 ξεκινά περίπου στο 75% της συνολικής διάρκειας ζωής, ενώ για τον χάλυβα DP 500 μόλις στο 55%. Επομένως ο TRIP ανθίσταται περισσότερο σαν υλικό στην έναρξη ρωγμής κόπωσης στην περιοχή της εγκοπής. Αντίθετα, ο προσδιορισμός των εικονικών ρυθμών διάδοσης ρωγμής για τα δύο υλικά στα δοκίμια με εγκοπή, έδειξε χαμηλότερους ρυθμούς στον DP 500 σε σχέση με τον TRIP. Οι διαφορές στις φάσεις έναρξης και διάδοσης ρωγμής για τα δύο υλικά φαίνεται να αλληλοαναιρούνται στο συνολικό διάγραμμα κόπωσης με εγκοπή των δύο υλικών όπου οι διαφορές εξομαλύνονται.

Οι αριθμητικές λύσεις πρόβλεψης, της εκκίνησης και διάδοσης ρωγμής σύμφωνα με τους νόμους Basquin και Paris, αποτελούν ένα αρκετά χρήσιμο εργαλείο πρόβλεψης, εάν έχουν προσεγγιστεί με καλή ακρίβεια οι σταθερές των δύο αυτών νόμων. Για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης των σταθερών του νόμου Paris όμως, πρέπει να

πραγματοποιηθούν δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια τύπου CT, για να εξασφαλίζεται η ισχύ των βασικών αρχών της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας.

8. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας προκύπτουν μερικά θέματα, τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνας:

- Μελέτη του φαινομένου διάδοσης της ρωγμής σε δοκίμια τύπου CT (στάδιο II) για τους χάλυβες TRIP και Dual Phase, όπου θα απουσιάζουν τα φαινόμενα πλαστικότητας και θα είναι αποδεκτή η εφαρμογή της γραμμικής ελαστικής θεωρίας θραύσης.
- Μελέτη της επίδρασης του ρυθμού εργοσκλήρυνσης κατά την κόπωση χαλύβων TRIP και Dual Phase μέσω πειραμάτων με κυκλικούς βρόγχους υστέρησης.
- Μεταλλογραφική ανάλυση κατά την διάδοση της ρωγμής, με σκοπό την μελέτη της επίδρασης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού στη συμπεριφορά κόπωσης χαλύβων TRIP.

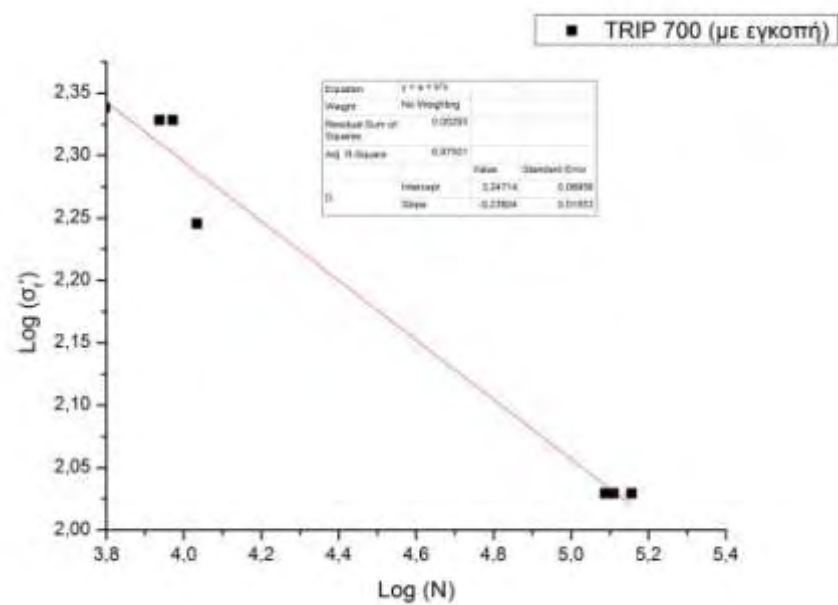
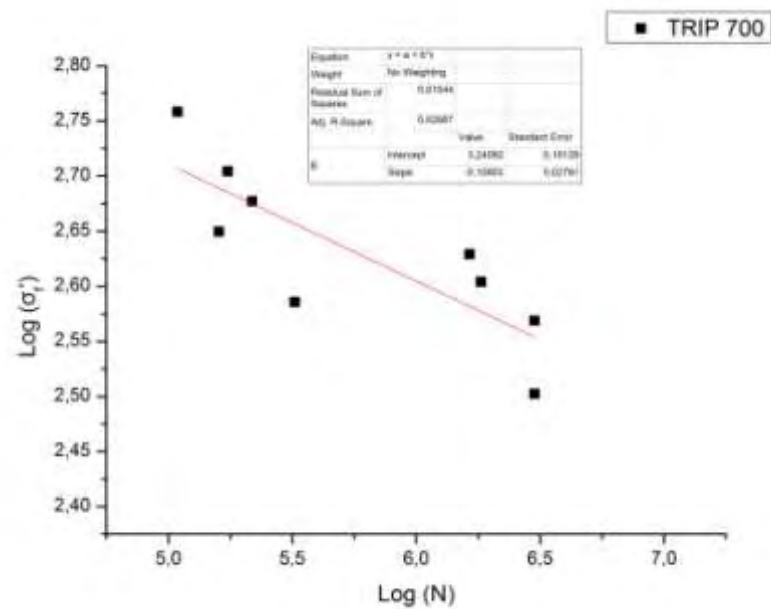
Βιβλιογραφία

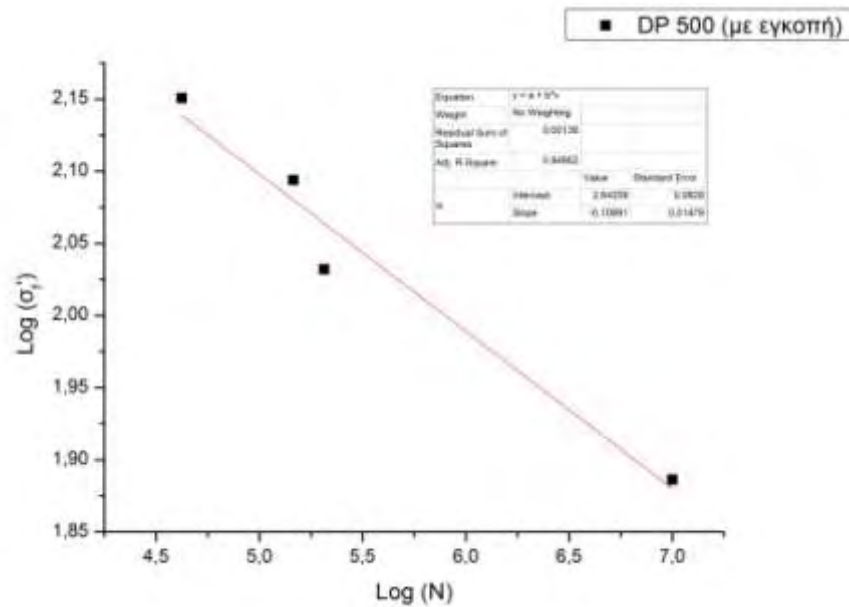
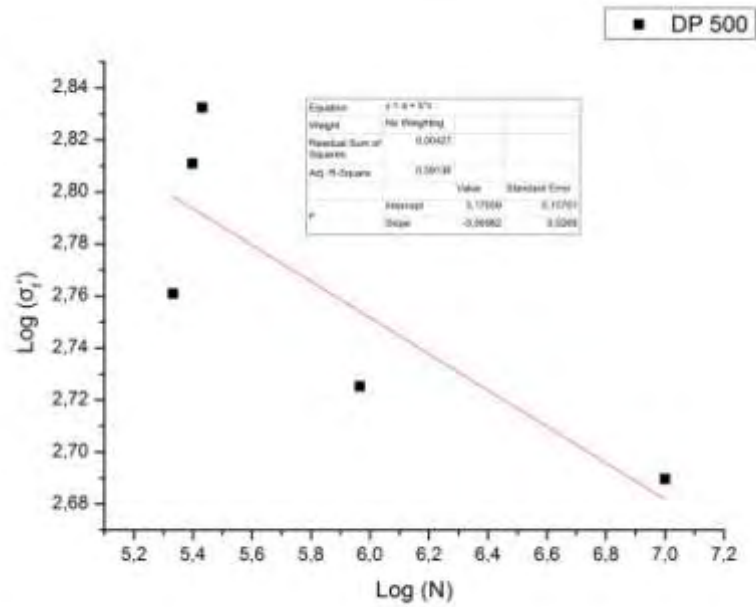
- [1] **Rankine, W. J. M.**, 1943. On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles; and on the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. *Proceedings, Institute of Civil Engineers*, Vol. 2, pp. 105-108
- [2] **Basquin, O.H.**, 1910. The exponential law of endurance tests, *Proceedings of ASTM*, Vol. 10(II), pp. 625-630
- [3] **Griffith, A. A.**, 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 221, pp.163-198
- [4] **Κερμανίδης, Α.**, 2003. Επίδραση της διάβρωσης στην δομική ακεραιότητα ελαφρών κατασκευών από κράμα Αλουμινίου 2024. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών
- [5] **Χαϊδεμενόπουλος, Γρ. Ν.**, 2007. Φυσική Μεταλλουργία. Εκδόσεις Τζιόλα
- [6] **Κερμανίδης, Θ.**, 2004. Μηχανική των θραύσεων. Πάτρα
- [7] **Paris, P.C., Erdogan, F.**, 1963. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering; Transaction, American Society of Mechanical Engineers, Series D* 85, pp. 528-534
- [8] **Jiang, Y., F. M.**, 2006. Modeling of Fatigue Crack Propagation. Mechanical Engineering Department, University of Nevada
- [9] **Maiya, P.S.**, 1979. Effects of notches on crack initiation in low cycle fatigue. *Materials Science and Engineering*, 38, pp. 289 - 294
- [10] **Atzori, B., Lazzarin, P., Meneghetti, G.**, 2003. Fracture mechanics and notch sensitivity. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26, pp. 257–267
- [11] **Duckworth, W.E., Ineson, E.**, 1963. The effects of externally introduced alumina particles on the fatigue life of En24 steel. *Clean Steel, Iron Steel Inst. Sp. Rep.*, 77, pp. 87-103
- [12] **Schijve, J.**, 1984. The practical and theoretical significance of small cracks. An evaluation. In: *Fatigue '84. Proceedings of the 2nd International Conference on Fatigue*, Birmingham, UK, 3-7 Sept. 1984, Warley, EMAS, 2, pp. 751-771

- [13] **Tanaka, K., Nakai, Y.**, 1983. Propagation and non-propagation of short fatigue cracks at a sharp notch. *Fatigue Engng. Mater. Struct.* 6, pp. 315–327
- [14] **Pippan, R., Berger, M., Stüwe, H.P.**, 1987. The Influence of crack length on fatigue crack growth in deep sharp notches. *Metall. Trans.* 18A, pp. 359–494
- [15] **Tesch, H. Doker, Trautmann, K. H., Pippan, Escobedo, R. C.**, 2006. A Discussion of the Applicability of ΔK -Values to Explain the Fatigue Crack Growth Behaviour of Short Cracks. *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures*, C., 9., pp. 851-852
- [16] **Miller, K.J.**, 1982. The short crack problem. *Fatigue Engng. Mater. Struct.* 5, pp. 223–232
- [17] **Stephens, I. R., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, O. H.**, 2001. *Metal Fatigue in Engineering*. Second Edition, Wiley Interscience, pp. 226-227
- [18] **Dowling, N., E.**, 2007. *Mechanical behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Third Edition, Pearson Education
- [19] **Newman, Jr., J. C., Raju, I. S.**, 1981. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack. *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 185–192
- [20] **Tada, H., Paris, P., C., Irwin, G., R.**, 2000 *The stress analysis of cracks handbook*. Professional Engineering Publishing Limited, Bury St. Edmunds and London, 3rd edition
- [21] **Qiao, H., Xu H.**, 1994. Two-parameter nominal stress approach. *International Journal of Fatigue* 17, pp. 339-341
- [22] **Jones, R., L., Phoplonker M., A., Byrne, J.**, 1989. Local strain approach to fatigue crack formation life at notches. *International Journal of Fatigue* 11, pp. 255-259
- [23] **Κλέπκος, Α.**, 2010. Μελέτη της έναρξης ρωγμής σε κόπωση διφασικών χαλύβων υψηλής αντοχής. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [24] **Noda, N.A., Sera, M., Takase, Y.**, 1994. Stress concentration factors for round and flat test specimens with notches. Mechanical Engineering Department, Kyushu Institute of Technology, Japan
- [25] **Κατσαρός, Θ.**, 2003. Μεταλλογραφική ανάλυση πολυφασικών χαλύβων διπλής φάσης (DP) και πλαστικότητας μετασχηματισμού (TRIP). Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

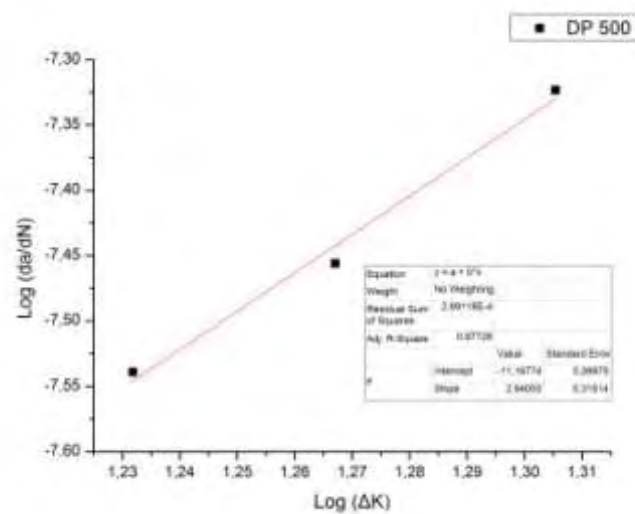
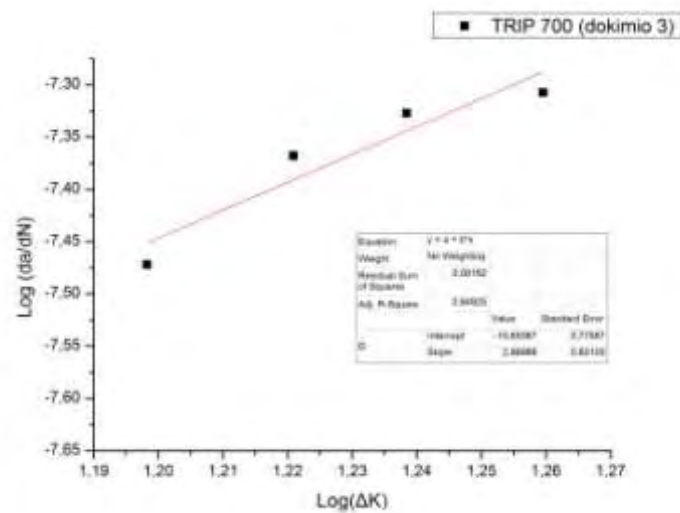
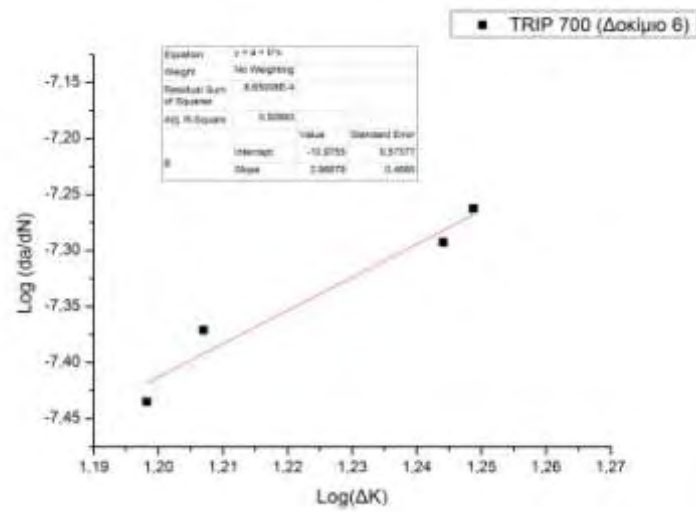
Παράρτημα

A.1 Προσέγγιση πειραματικών σημείων για την εξαγωγή των σταθερών Basquin





A.2 Προσέγγιση πειραματικών σημείων για την εξαγωγή των σταθερών Paris



A.3 Αλγόριθμος πρόβλεψης διάδοσης ρωγμής σύμφωνα με το νόμο Paris

Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται τα μεταβλητά ορίσματα εισόδου, τα οποία τροποποιούνταν κάθε φορά, κατά την ανάγνωση του κώδικα ανά περίπτωση.

```
clear all; close all;
tic
Smax = 225;
Smin = 22.5;
N = 107000;
h = waitbar(0,'Please wait...');
DS = Smax - Smin;
a0 = ones(1,N);
da = ones(1,N);
Kmax = zeros(1,N);
Kmin = zeros(1,N);
DK = zeros(1,N);
i = 1;
C = 6.80*(10^(-12));
m = 2.94;
a0(1)=1.8015 *(10^(-3));
while i<N
    Kmax(i) = 1.119*Smax*((pi*a0(i))^0.5);
    Kmin(i) = 1.119*Smin*((pi*a0(i))^0.5);
    DK(i) = Kmax(i) - Kmin(i);
    da(i) = C*(DK(i)^n);
    a0(i+1) = a0(i) + (da(i));
    waitbar(i/N)
    i = i+1;
end
toc
figure(1);hold on;
plot(a0)
V=N/100;
q = zeros(1,V);
p = zeros(1,V);
j=1;
q(j)=a0(1);
p(j)=1;
for i=100:100:N
    j=j+1;
    q(j)=a0(i);
    p(j)=i;
end
```